



**Tiago Miguel Da Fonseca Cunha**

Licenciado em Ciências de Engenharia Física

## **Analizador de Dispersão de Energia**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Física

Orientador: Doutor Filipe Ferreira da Silva

Co-Orientador: Prof. Doutor Paulo Limão-Vieira

Júri

Presidente: Prof. Doutor Orlando Teodoro

Arguente(s): Prof. Doutor Yuri Nunes

Vogal(ais): Doutor Filipe Ferreira da Silva  
Prof. Doutor Paulo Limão Vieira



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2013**



**Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa**

**Tiago Miguel da Fonseca Cunha**

Licenciado em Ciências de Engenharia Física

## **Analizador de dispersão de Energia**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Física

Orientador: Doutor Filipe Ribeiro Ferreira da Silva  
Co-orientador: Professor Doutor Paulo Manuel Assis Loureiro Limão Vieira

### **Júri**

Presidente:

Prof. Doutor Orlando Teodoro

Arguente:

Prof. Doutor Yuri Nunes

Vogal(ais):

Prof. Doutor Paulo Limão Vieira  
Doutor Filipe Ribeiro Ferreira da Silva

Setembro de 2013

---



# Analizador de dispersão de energia

Copyright©2013 – Em nome de Tiago Miguel da Fonseca Cunha, aluno da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

Ao Doutor Filipe Ferreira da Silva e Professor Doutor Paulo Limão-Vieira, pelo enorme apoio, dedicação e paciência prestados durante esta dissertação.

Ao agora Doutor Diogo Almeida pela grande ajuda prestada. E pelas “playlists” que animaram muitas manhãs.

Ao Guilherme Meneses, João Rafael, Christoph Widmann e Juscelino Ferreira pelo interesse demonstrado, pelo apoio prestado e pela boa disposição.

Agradeço também a todos os referidos anteriormente, pelo bom ambiente vivido dentro e fora do laboratório que fizeram desta experiência uma experiência bastante positiva.

Ao João Faustino, pela ajuda prestada no trabalho de maquinação.

Ao coordenador do curso Prof. Dr. Orlando Teodoro pela ajuda, por estar sempre disponível. Não podíamos ter melhor coordenador.

Aos grandes amigos que fui ganhando durante este percurso: Diogo Miguel, Ana Palma, Sara Candeias, Mónica Lamas, Luís Silva, e Miguel Moita, pela boa disposição e pelas jantaras que tornaram toda esta experiência excelente! Todos me ajudaram a alcançar esta etapa da melhor maneira: com um sorriso.

Por último, quero agradecer aos meus pais e à minha irmã que, apesar de todas as adversidades que foram surgindo, nunca me deixaram de apoiar.

***“So long and thanks for all the fish!”***

The Hitchhiker's Guide to the Galaxy , 1984





## Resumo

O objectivo principal desta dissertação era criar um analisador capaz de determinar a dispersão de energia do feixe de potássio utilizado no aparelho de feixes moleculares cruzados em colisões átomo-molécula. Dimensionou-se, com esse intuito, um analisador capaz de medir desvios de energia correspondentes a 0,1% da energia do feixe (esta dispersão varia com a energia). Esse dimensionamento foi efectuado com recurso ao programa SIMION<sup>®</sup> onde se realizaram todas as simulações referentes ao sistema de lentes electrostáticas bem como de diversas trajectórias do feixe de iões de potássio. Os resultados obtidos permitiram obter informação relativamente à transmissão e dispersão angular do feixe, o que fez com que o plano de trabalhos se estendesse ao estudo de possíveis alterações que optimizassem a taxa de aproveitamento de iões  $K^+$  produzidos (resultando assim numa maior taxa de colisões e consequentemente, numa redução no tempo de aquisição).

O plano de trabalhos dividiu-se portanto, no estudo das propriedades do feixe iónico que conduziram ao dimensionamento do sistema de análise de dispersão de energia, e nos projectos de optimização do sistema de extracção responsável pela produção do feixe de  $K^+$ .

O analisador de dispersão de energia divide-se em três partes fundamentais: um sistema de lentes *Einzel*, um analisador de retardamento e um detector do tipo canaltrão. Os estudos efectuados sobre a extensão espacial e angular do feixe de iões de potássio em ambas as câmaras (pelas quais é composto o aparelho de feixes cruzados), levaram ao dimensionamento do conjunto de eléctrodos, que formam a lente *Einzel*.

Quanto ao sistema extractor de iões de  $K^+$ , são sugeridas duas configurações: uma consiste numa cavidade cilíndrica e outra com a geometria de Pierce. A cavidade cilíndrica surgiu com intuito de ser facilmente implementada (sem grandes modificações estruturais a curto prazo), no interior da câmara de produção do feixe iónico. Esta cavidade foi testada envolvendo a fonte de iões com uma folha de molibdénio.

Para o sistema de convergência do feixe foram testadas diversas configurações, em que se destacaram duas que são descritas nesta dissertação pelas suas transmissões, que permitem obter valores na ordem de 4,7% e 5,3%. A necessidade da sua implementação surge da grande discrepância entre o diâmetro da pastilha de potássio e o diâmetro da abertura da câmara de troca de carga (que se encontra em frente desta cujo diâmetro de entrada é de 1mm), e que conduz a uma baixa transmissão. A configuração actual consiste numa geometria planar sem nenhum poder focal, onde se verifica uma transmissão de 0,004%.



## Abstract

The main goal of this work was to determine the energy dispersion of the potassium ion beam used in a cross molecular beam setup for atom-molecule collisions. To achieve this, it has been developed an analyzer capable of measuring deviations corresponding to 0,1% of the beam's energy (this deviations varies with the beam's energy, so to lower energies it takes smaller values). Many simulations, concerning the beam properties, were made using the SIMION software, whose results were quite instructive. It has been obtained very interesting data about the beam's transmission and it's spatial divergence, which helped sizing the energy dispersion analyzer and also led to an extension of the work plan and including a study of possible alterations on the cross-beam apparatus, that would improve the rate of  $K^+$  in the collision chamber, resulting in a reduction of the spectra acquisition time. Thus, the work plan was divided in two parts: the study of various properties of the beam, which led to the design of the energy dispersion analyzer, and optimization projects with respect to the extraction system, which has the main role concerning the production of the  $K^+$  beam. In a complementary level, some current measurements were made to confirm the results obtained in SIMION.

As to the extractor system, two configurations are suggested: one consists in a cylindrical cavity with straight walls, and the other with Pierce geometry. A cylindrical cavity is very easy to implement without major structural changes (in the short term), in the chamber where the  $K^+$  production takes place. This cavity was tested using a molybdenum foil surrounding the ion source. This resulted in a current increase.

For the convergence of the beam system, which is inexistent in the present configuration, it has been tested many others in which stood out two (that are described in this dissertation), with their transmissions walking around 4,7% and 5,3%. The necessity of this implementation comes from the large discrepancy between the ion source's diameter and the charge exchange chamber opening, which is the major cause of such low transmission. The current configuration consists of a planar geometry with no focal power, where there is a transmission of 0,004%.



## Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

CEFITEC	Centro de Física e Investigação Tecnológica
LCAM	Laboratório de Colisões Atómicas e Moleculares
CTC	Câmara de troca de carga
PC	Partícula(s) carregada(s)
ToF	“Time of Flight” (Tempo de voo)
FDC	Fenda de Colimação
TI	“Tira-lões”
LT	Detector Langmuir-Taylor
FWHM	“Full width at Half Maximum” (largura a meia altura)
I	Intensidade de Corrente
J,j	Densidade de corrente
n	Quantidade de partículas carregadas
V <sub>p</sub>	Tensão de polarização
V <sub>d</sub>	Tensão de deflexão
v	Velocidade
A, S	Área
$\sigma$	Desvio-padrão
$\mu$	Valor médio
e	Unidade de carga elementar
R	Resolução
r	Raio
$\theta$	Ângulo de lápis
$\alpha$	Ângulo do feixe
f	Distância focal
q	Distância da imagem
p	Distância do objecto
M <sub><math>\alpha</math></sub>	Ampliação angular
M <sub>l</sub>	Ampliação linear
n <sub>i</sub>	Índice de refração do meio i
V <sub>i</sub>	Potencial aplicado no eléctrodo i
H <sub>1</sub> , H <sub>2</sub>	Planos principais
d	Espaçamento
K <sup>+</sup>	Ião potássio
K <sup>0</sup>	Átomo de potássio
K <sup>+</sup> <sub>hip</sub>	Ião potássio hipertérmico
K <sup>0</sup> <sub>th</sub>	Átomo de potássio térmico
K <sup>+</sup> <sub>th</sub>	Ião potássio térmico
K <sup>0</sup> <sub>hip</sub>	Átomo de potássio hipertérmico
A <sup>+</sup> <sub>hip</sub>	Ião de um metal alcalino hipertérmico
A <sup>0</sup> <sub>th</sub>	Metal alcalino térmico
A <sup>+</sup> <sub>th</sub>	Ião de um metal alcalino térmico
A <sup>0</sup> <sub>hip</sub>	Metal alcalino hipertérmico
E <sub>ef</sub>	Energia efectiva
$\Delta E$	Diferença de energia
D	Diâmetro
c.d.o.	Comprimento de onda
$\lambda$	Comprimento de onda
E <sub>c</sub>	Energia cinética

T	Temperatura
k	Constante de Boltzmann
t	Coeficiente de transmissão

# Índice

Agradecimentos .....	v
Resumo.....	vii
Abstract .....	ix
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos .....	xi
Índice de Figuras .....	xv
Índice de Tabelas.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Objectivos.....	1
1.2. Configuração básica de um aparelho de feixes cruzados .....	1
1.3. Estrutura da dissertação .....	2
2. Óptica de partículas carregadas.....	5
2.1. Analogia entre óptica ondulatória e óptica de partículas carregadas .....	5
2.1.1. Lei de Snell.....	5
2.1.2. Lei de Helmholtz-Lagrange.....	7
2.1.3. Pontos cardeais .....	8
2.1.4. Equação do movimento paraxial [5] .....	9
2.1.5. Determinação de linhas equipotencias[5] .....	10
2.2. Lentes electrostáticas.....	11
2.2.1. Geometria de lentes.....	12
2.3. Aberrações em lentes electrostáticas .....	15
2.4. Analisadores de energia [6].....	17
2.4.1. Analisadores de deflecção de placas paralelas .....	17
2.4.2. Analisadores Cilíndricos .....	18
2.4.3. Analisadores de retardamento .....	19
3. Equipamento Experimental.....	21
3.1. Câmara de produção de feixe de potássio neutro .....	21
3.1.1. Sistema de troca de carga .....	21
3.1.2. Placas deflectoras de iões ou “Tira-íões” .....	22
3.2. Câmara de colisões.....	23
3.3. Sistema de vácuo.....	23

3.3.1.	Bombas rotatórias .....	24
3.3.2.	Bombas difusoras .....	24
3.3.3.	Válvula electromagnética.....	24
3.3.4.	Manómetros.....	25
3.3.5.	Bomba turbomolecular .....	26
3.4.	Espectrómetro de massa do tipo tempo de voo .....	26
3.4.1.	Sistema de Extracção .....	27
3.4.2.	Detector do tipo canaltrão .....	27
4.	Optimização do feixe de Potássio .....	29
4.1.	Simulação da trajectória do feixe de potássio no aparelho de feixes cruzados .....	29
4.2.	Optimização da densidade do feixe de iões $K^+$ .....	33
4.2.1.	Sistema de extracção .....	34
4.2.2.	Sistema de convergência.....	38
5.	Analisador de dispersão de energia de partículas carregadas.....	43
5.1.	Descrição do analisador .....	44
5.1.1.	Sistema de focalização – lente <i>Einzel</i> .....	44
5.1.2.	Analisador de energia – Sistema de redes .....	45
5.1.3.	Detector (do tipo canaltrão) .....	46
5.2.	Resolução em energia .....	46
6.	Conclusões e Trabalho Futuro.....	51
6.1.	Analisador de dispersão de energia .....	51
6.2.	Simulações.....	51
6.2.1.	Configuração actual.....	51
6.2.2.	Sistema de extracção e de focalização.....	52
6.3.	Trabalho Futuro.....	52
	Referências Bibliográficas .....	53
	Anexos .....	55



## Índice de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Configuração de um aparelho de feixes cruzados. ....	2
<b>Figura 2.1.</b> Esquema da trajectória de um electrão sob um campo eléctrico uniforme [3].....	4
<b>Figura 2.2.</b> Ilustração da refacção de uma partícula carregada através de uma série de pequenos incrementos de potencial .....	5
<b>Figura 2.3.</b> Descrição do ângulo de lápis e do ângulo de incidência do feixe[2].....	6
<b>Figura 2.4.</b> A figura mostra como usar a pupila, ao colocá-la no foco da lente para criar uma imagem no infinito. Dessa forma o ângulo do feixe é nulo – tem-se um feixe coerente (imagem adaptada) [2].....	7
<b>Figura 2.5.</b> Representação dos pontos cardeais de uma lente electrostática. $H_1$ e $H_2$ são os planos principais e M o plano de simetria da lente. É possível observar outros pontos tais como: os focos $F_1$ e $F_2$ , as suas distâncias focais, $f_1$ e $f_2$ , respectivamente. Também se pode observar o traço de dois raios paraxiais, a título de exemplo [4].....	7
<b>Figura 2.6.</b> Malha computacional envolvendo cinco pontos .....	9
<b>Figura 2.7.</b> Dados obtidos através de soluções numéricas da equação do movimento de um electrão atravessando uma lente cuja precisão é estimada entre 1 a 3% [7].....	12
<b>Figura 2.8.</b> Propriedades de uma lente assimétrica (à esquerda), e de uma lente <i>Einzel</i> (à direita) [7].....	12
<b>Figura 2.9.</b> À esquerda, a representação da emissão de electrões, acelerados por um potencial $V_0$ e focalizados por lente <i>Einzel</i> composta por três discos de abertura circular [8]. À direita, a focalização de um feixe de iões simulado em ambiente SIMION [9].....	13
<b>Figura 2.10.</b> Distribuição de um feixe de electrões em diferentes planos após a passagem por uma lente electrostática de dois elementos. Os raios paraxiais encontram-se focados no plano de Gauss. Os raios com maior ângulo de entrada possuem um foco mais próximo da lente. O disco de confusão mínima é onde o feixe possui um menor diâmetro [10].....	15
<b>Figura 2.11.</b> Simulação de feixes pulsados de protões, a baixas e altas correntes, com o PSI Graphic Transport Framework. Neste exemplo, um feixe de protões de alta corrente (15mA), com uma energia de 40keV deixa a fonte de iões. Para comparação, um feixe de baixa corrente (0,015mA) também é mostrado. Um solenóide é usado para reorientar o feixe originando uma cintura entre o solenóide e o tubo acelerador[11].....	16
<b>Figura 2.12.</b> (a) Esquema de um analisador de placas paralelas; (b) Esquema de um analisador de energia de placas paralelas cujas fendas se encontram isoladas de campos externos; (c) Esquema de um analisador de placas paralelas com eléctrodos auxiliares que “cortam” as perturbações do campo nos bordos das placas [7]. ....	18
<b>Figura 2.13.</b> Analisador radial (à esquerda) e analisador de espelhos cilíndricos (à direita) [7].....	17
<b>Figura 2.14.</b> Esquema de um analisador semiesférico (adaptado de imagem de [12]).....	18

<b>Figura 2.15.</b> Esquema mostrando o funcionamento de um analisador de retardamento.....	18
<b>Figura 3.1.</b> a) forno de potássio neutro; b) câmara de troca de carga; c) fonte de iões de potássio; d) placas de deflexão; e) detector de Langmuir-Taylor; f) forno de biomoléculas; g) Espectrómetro de massa (TOF) [13][14].....	20
<b>Figura 3.2.</b> Esquema da câmara de troca de carga[14].....	21
<b>Figura 3.3.</b> Detector Langmuir-Taylor [13].....	22
<b>Figura 3.4.</b> Esquema do sistema de vácuo[13].....	24
<b>Figura 3.5.</b> Espectrómetro de massa do tipo tempo de vo[13].....	25
<b>Figura 3.6.</b> Esquema representativo do multiplicador de electrões do tipo canaltrão [7].....	26
<b>Figura 4.1.</b> Trajectória do feixe de potássio simulado em ambiente SIMION. A válvula entre-câmaras como não tem nenhum papel importante na trajectória do feixe, foi desenhada numa escala maior para uma melhor visualização.....	27
<b>Figura 4.2.</b> Dependência linear da energia com a tensão.....	28
<b>Figura 4.3.</b> Imagem do feixe de potássio de $5E4$ iões em que é possível verificar o grau de dispersão espacial (à esquerda). Nesta simulação em SIMION, observa-se não só os iões que embatem na chapa da fenda de colimação, como também os iões emitidos na zona de extracção que se traduz num círculo bem definido. À direita, uma mesma imagem de um feixe de potássio, mas com $2 \times 10^6$ de iões. Nesta percebem-se melhor os contornos do feixe ao chegar à fenda de colimação.....	29
<b>Figura 4.4.</b> Comparação da corrente de iões $K^+$ no “tira-iões” e no Langmuir-Taylor [17].....	30
<b>Figura 4.5.</b> Correntes no “tira-iões e no detector Langmuir-Taylor, medidas com o forno de potássio sólido desligado.....	31
<b>Figura 4.6.</b> Esquema em blocos das melhorias propostas.....	31
<b>Figura 4.7.</b> Ilustração do efeito divergente do campo eléctrico na abertura da ctc (esquerda), obtida em SIMION, juntamente com um esquema exemplificativo do sistema desenhado e simulado (direita)[6].....	32
<b>Figura 4.8.</b> Análise do comportamento do feixe face a cavidades com diferentes profundidades, e face a zonas de extracção mais extensas. a) cavidade com 1mm de altura e zona de extracção com 5mm; b) cavidade com 2mm de altura e zona de extracção com 5mm; c) cavidade com 3mm de altura e zona de extracção com 5mm; d) cavidade com 3mm de altura e zona de extracção com 4mm; e) cavidade com 2mm de altura e zona de extracção com 10mm; f) cavidade com 2mm de altura e zona de extracção com 3mm de comprimento.....	34
<b>Figura 4.9.</b> Comparação da trajectória do feixe de potássio aplicando uma tensão de polarização de 100V (esquerda), e uma tensão de 20V (direita). Não há alterações na forma e trajectória do feixe.....	34
<b>Figura 4.10.</b> Correntes medidas no detector Langmuir-Taylor para tensões de aceleração entre os 20V e os 300V.....	35

<b>Figura 4.11.</b> Transmissão de $K^+$ à saída da CTC para diferentes comprimentos da zona de extracção. Simulações efectuadas em SIMION com uma amostra de apenas 1000 partículas.....	35
<b>Figura 4.12.</b> Comparação das transmissões após a CTC, para diferentes distâncias entre a fonte de iões e a CTC.....	36
<b>Figura 4.13.</b> Esquemas de dois dos sistemas de lentes simulados. No sistema da direita o 2º e o 4º eléctrodo consistem numa cavidade cilíndrica com uma abertura circular no centro.....	37
<b>Figura 4.14.</b> Dimensões e localização do sistema de convergência 1 e 2.....	38
<b>Figura 4.15.</b> Trajectória do feixe de potássio usando dois sistemas de convergência diferentes. O sistema de baixo aparenta ter 6 eléctrodos estando os dois eléctrodos centrais ao mesmo potencial. Pode-se assumir que ambos se encontram ligados e que se tem um único eléctrodo central, que quando ligado à terra, apenas serve de espaçador entre as lentes, aumentando ou diminuindo as suas propriedades focais.....	38
<b>Figura 4.16.</b> Feixe formado com cavidade de extracção de paredes inclinadas.....	39
<b>Figura 5.1.</b> Esquema do sistema de análise de dispersão em energia desenhado em ambiente AUTOCAD. ....	43
<b>Figura 5.2.</b> Esquema simplificado do sistema de análise de energia de partículas carregadas. ....	43
<b>Figura 5.3.</b> Esquema do analisador de energia a focalizar o feixe de $K^+$ e a embater no canaltrão. À direita um esquema tridimensional obtido em ambiente SIMION. ....	44
<b>Figura 5.4.</b> Discos de aço.....	44
<b>Figura 5.5.</b> Recta de calibração (para um espaçamento de 2mm entre os eléctrodos). ....	45
<b>Figura 5.6.</b> Discos de aço que constituem o filtro de energia. Pode-se observar na imagem a anilha no interior do disco que foi usada para esticar a rede de aço na abertura. ....	45
<b>Figura 5.7.</b> À esquerda, o perfil de energia do feixe de potássio, elaborado com os dados obtidos em SIMION. À direita, o sinal que se obtém depois de derivar o gráfico da esquerda. ....	46
<b>Figura 5.8.</b> Distribuição normal ou Gaussiana [1].....	44
<b>Figura 5.9.</b> Sinal derivado do espectro de energia para um feixe de 50eV e 100eV. Como se pode constatar o desvio é muito pequeno. Tem-se um FWHM=0,02eV e FWHM=0,11eV, respectivamente. Como esperado tem-se maior resolução para menor energia do feixe. ....	47
<b>Figura 5.10.</b> Esquema que ilustra o posicionamento da lente.....	48
<b>Figura 5.11.</b> Esquema da montagem do analisador de dispersão em energia efectuado em AUTOCAD. ....	48
<b>Figura 5.12.</b> Analisador de dispersão de energia em que se pode observar: a) a lente <i>Einzel</i> ; b) o analisador de energia por retardamento; c) o detector do tipo canaltrão.....	46
<b>Figura 5.13.</b> Local onde será colocado o analisador.....	47
<b>Figura A.1.</b> Representação das linhas equipotenciais e mapeamento do campo eléctrico em dois eléctrodos cilíndricos, em que $V_1=0$ e $V_2=50V$ para melhor entendimento do comportamento de PC no seu interior. Foi utilizado o software QuickField Student.....	52



## Índice de Tabelas

**Tabela 4.1.** Energia do feixe de potássio em função da tensão de polarização, em SIMION..... 30

**Tabela 4.2.** Coeficientes de transmissão para o feixe de potássio, obtidos por simulação em SIMION, para uma amostra de  $1 \times 10^5$  iões de  $K^+$  à saída da fonte. .... 31

**Tabela 4.3.** Cálculo da densidade de corrente na fonte de iões com o forno de potássio sólido ligado..... 32

**Tabela A.1.** Correntes medidas no detector Langmuir-Taylor com o forno ligado e desligado. 55



# 1. Introdução

## 1.1. Objectivos

O objectivo principal desta dissertação de mestrado integrado em engenharia física, centra-se no dimensionamento e construção de um analisador da dispersão em energia do feixe de átomos de potássio usado no estudo de colisões átomo-molécula. Este analisador será montado no aparelho de feixes cruzados, na direcção principal do feixe de potássio. O tema desta dissertação surge integrado no trabalho experimental realizado no Laboratório de Colisões Atómicas e Moleculares (LCAM), do CEFITEC.

No aparelho de feixes cruzados um feixe neutro de átomos de potássio colide com um feixe molecular efusivo. Da interacção dos dois feixes, e através de processo de transferência de electrão, formam-se iões negativos resultantes da fragmentação molecular, que são posteriormente analisados por espectrometria de massa do tipo tempo de voo (ToF). Contudo, nada se sabe quanto à dispersão em energia do feixe de potássio utilizado para esses estudos.

O plano de trabalhos dividiu-se no estudo da extensão angular do feixe, e no dimensionamento do sistema de análise de dispersão de energia que consiste em três partes fundamentais: um sistema de lentes *Einzel*, um analisador de retardamento e um detector do tipo canaltrão.

Das análises efectuadas em ambiente SIMION<sup>®</sup>, foi possível compreender da melhor forma várias propriedades do feixe de  $K^+$  o que permitiu estender o plano de trabalhos e formular formas de melhoria do aproveitamento de iões  $K^+$  emitidos pela fonte. Tais modificações são essenciais para aumentar a taxa de colisões átomo-molécula e diminuir desse modo o tempo de aquisição dos espectros formados pelos fragmentos resultantes. Para esse fim, procedeu-se à análise e optimização de algumas configurações de lentes electrostáticas juntamente com um sistema de extracção.

## 1.2. Configuração básica de um aparelho de feixes cruzados

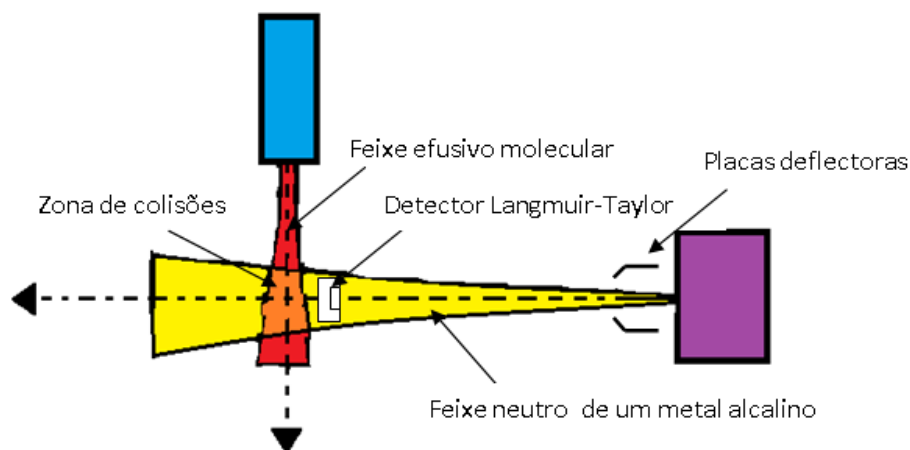
Um aparelho de feixes cruzados para estudos de transferência de electrão consiste fundamentalmente no cruzamento entre um feixe neutro, normalmente de um metal alcalino (devido à sua baixa energia de ionização), e um feixe molecular efusivo. No dispositivo experimental que se encontra no LCAM, o feixe de átomos alcalinos é de potássio. Para a monitorização da corrente desse feixe, é utilizado um detector do tipo Langmuir-Taylor localizado antes da zona de colisões.

A formação de feixes neutros de metais alcalinos é baseada no processo de troca de carga ressonante, em que um ião alcalino hipertérmico ( $A_{hip}^+$ ) troca de carga com um átomo térmico ( $A_{th}^0$ ) do mesmo metal alcalino cedendo-lhe um electrão e mantendo a mesma energia cinética, resultando num ião alcalino térmico ( $A_{th}^+$ ) e um átomo neutro hipertérmico ( $A_{hip}^0$ ):



Os iões ( $A_{hip}^+$ ) são acelerados da fonte iónica através de uma diferença de potencial que é aplicada entre a fonte que se encontra tipicamente a 2,5mm da câmara de troca de carga (CTC), adquirindo energia cinética correspondente ao valor de tensão aplicado. Interligado à

CTC encontra-se um forno de metais alcalinos que por aquecimento permite vaporizar átomos térmicos ( $A_{th}^0$ ). O vapor de metal alcalino formado em contacto com o feixe iónico do mesmo metal, permite o processo de troca de carga ressonante. As placas deflectoras consistem num par de eléctrodos, nos quais aplicando uma determinada diferença de potencial entre elas, deflectem parcial ou totalmente os feixes iónicos que saem da CTC, i.e.,  $A_{hip}^+$  e  $A_{th}^+$ . Estas placas permitem assim garantir que o feixe de potássio seja puramente neutro. Os iões alcalinos deflectidos são colectados numa das placas que se encontra ligada a um electrómetro (fig.3.2). A corrente resultante pode ser medida e utilizada para determinar o número de iões que atravessa a CTC sem serem neutralizados.



**Figura 1.1.** Esquema da configuração de um aparelho de feixes cruzados.

Através do detector de Langmuir-Taylor é possível a monitorização de corrente imediatamente antes da zona de colisões. O detector de Langmuir-Taylor é sensível tanto a partículas neutras como a partículas carregadas, pelo que pode servir para extrapolar a taxa de troca de carga ressonante efectiva no interior da câmara medindo a corrente para um feixe inteiramente iónico (com o forno de metais alcalinos desligado), e a corrente de um feixe neutro, após a transferência de carga (ou seja, com o forno ligado).

O aparelho de feixes moleculares cruzados está equipado com um espectrómetro de massa do tipo tempo de voo (time-of-flight, ToF), para análise em massa/carga dos fragmentos aniónicos produzidos na zona de colisão. Desconhece-se o valor experimental da dispersão em energia do feixe de átomos alcalinos que no caso do aparelho no LCAM é de potássio, o que nos conduz ao tema desta dissertação cujo objectivo é a sua determinação através da montagem de um analisador de energia.

### 1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos. No primeiro capítulo é apresentado o tema da dissertação e os objectivos. No capítulo 2, introduzem-se conceitos e diferentes tipos de configurações de lentes electrostáticas, assim como alguns tipos de analisadores de energia, e monocromadores. O capítulo 3 descreve o aparelho de feixes cruzados, onde será implementado e testado o analisador de energia. No capítulo 4 são discutidas algumas alterações ao sistema extractor de iões  $K^+$  e sugeridos dois sistemas de lentes que em conjunto



com um novo sistema de extracção permitirá melhorias na intensidade do feixe na zona de colisão. O capítulo 5 descreve os componentes do analisador de dispersão de energia, bem como os processos que levaram ao seu dimensionamento e concepção. Esta dissertação termina com o capítulo 6 onde são discutidos todos os resultados obtidos, e se tecem algumas considerações quanto a possíveis trabalhos futuros.



## 2. Óptica de partículas carregadas

Um feixe de partículas consiste num grupo de partículas que possuem duas características: viajam na sua maioria, na mesma direcção e têm aproximadamente a mesma energia cinética. Do mesmo modo que num laser se pretende um elevado grau de coerência, i.e., feixe bem direccionado e monocromático, também é essencial a obtenção de um feixe de partículas carregadas (PC) coerente na maioria das aplicações.

São vários os parâmetros que devem também ser determinados para caracterizar um feixe de PC, tais como o tipo de partícula, a sua energia cinética média bem como a sua dispersão, a corrente, a potência, e a área transversal do feixe.

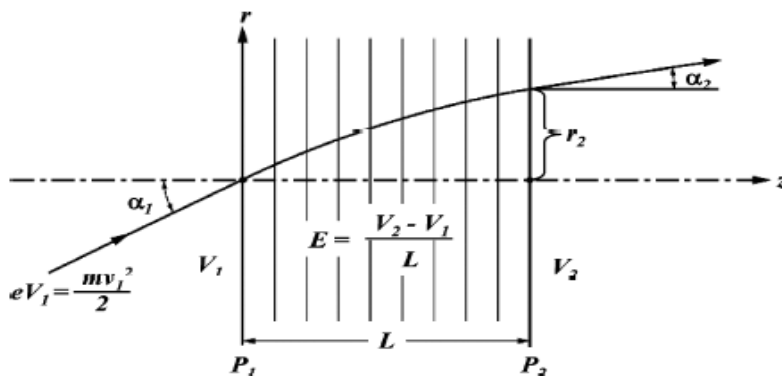
Devido ao facto da energia de repouso das partículas carregadas ser alta ( $E_{\text{eléctron}} = mc^2 = 512\text{keV}$  e  $E_{\text{protão}} = 938\text{MeV}$ ), é possível recorrer à dinâmica Newtoniana para determinar as suas trajectórias [2].

### 2.1. Analogia entre óptica ondulatória e óptica de partículas carregadas

As propriedades “ópticas” associadas a um feixe de PC são similares às propriedades associadas a um feixe de fótons. Por esse motivo, é interessante analisar de forma breve e sucinta as leis da óptica geométrica e observar de que modo se aplicam a partículas carregadas.

#### 2.1.1. Lei de Snell

Quando um feixe de PC entra num espaço sujeito a um campo eléctrico uniforme, estas são sujeitas a uma aceleração que vai influenciar a sua velocidade e a sua trajectória. A alteração na sua trajectória vai depender do ângulo de incidência do feixe com a normal às superfícies equipotenciais – similar à refacção da luz quando um feixe atravessa meios com índice de refacção diferentes, esta é designada por Lei de Snell.



**Figura 2.1.** Esquema da trajectória de um electrão sob um campo eléctrico uniforme. As linhas verticais entre  $V_1$  e  $V_2$  correspondem a linhas equipotenciais. Adaptado da ref. [3].

Considere-se um ião de potássio com velocidade  $v_i$  a entrar num espaço que divide duas regiões com potenciais  $V_1$  e  $V_2$ . Os ângulos de incidência são medidos da mesma em relação à recta normal à superfície.

Assumindo que o ião foi acelerado a partir do repouso ( $V_0 = 0V$ ), de acordo com a lei da conservação de energia, a sua energia cinética na região com o potencial  $V_1$  é:

$$q(V_1 - V_0) = \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (2.1)$$

Quando, por exemplo, um ião entra num espaço sujeito a um campo eléctrico,  $\vec{E}$ , sempre que atravessa uma superfície equipotencial, a componente da velocidade tangente à superfície não é alterada. Apenas a componente normal sofre a força do campo eléctrico (fig. 2.1).

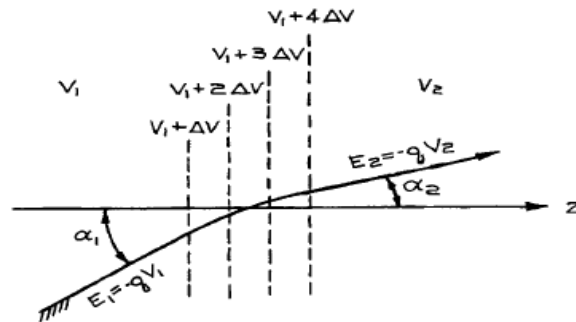
$$v_1 \sin \alpha_1 = v_2 \sin \alpha_2 \Leftrightarrow \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{\frac{2q(V_1 - V_0)}{m}}}{\sqrt{\frac{2q(V_2 - V_0)}{m}}} = \sqrt{\frac{V_1}{V_2}}, \quad (\text{para } V_0 = 0V)$$

Portanto a Lei de Snell para partículas carregadas toma a forma da equação 2.2.

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Por análise da Lei de Snell para PC, pode-se constatar que a trajectória de qualquer partícula carregada só depende das tensões aplicadas nos eléctrodos.

A noção de refacção de um feixe de partículas carregadas numa fronteira de potencial é bastante útil pois nem sempre é possível deduzir matematicamente a sua trajectória numa lente electrostática, mesmo que o campo tenha sido experimentalmente descrito. O campo não varia de forma abrupta como acontece com a luz quando refractada. Mas, pode-se estudar este campo comparando-o a uma série de pequenos incrementos na diferença de potencial, tal como ilustrado na fig.2.2.



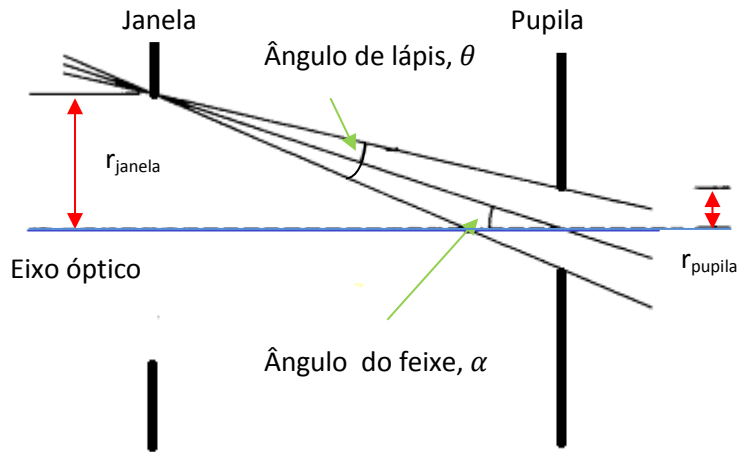
**Figura 2.2.** Ilustração da refacção de uma partícula carregada através de uma série de pequenos incrementos de potencial. Adaptado da ref. [4]

Esta propriedade pode ser explorada em óptica de PC quando aplicado ao fabrico de lentes. Constata-se assim que a variação da intensidade e a geometria das superfícies equipotenciais são equivalentes à variação da forma das lentes aplicadas a feixes fotónicos e à variação dos respectivos índices de refacção.

### 2.1.2. Lei de Helmholtz-Lagrange

Geralmente são utilizadas em lentes electrostáticas duas aberturas para definir a extensão espacial e angular do feixe. A extensão espacial do feixe é definida pela janela do sistema, e a extensão angular pela pupila.

Considere-se uma emissão isotrópica (que não depende da direcção). Cada ponto dentro da área delimitada pela janela dá origem a um ângulo agudo como se mostra na figura 2.3, ângulo este designado por ângulo de lápis. Desta forma consegue-se quantificar a extensão angular do feixe. O efeito físico que dá origem ao ângulo de lápis encontra-se relacionado com o tamanho da fonte.



**Figura 2.3.** Descrição do ângulo de lápis e do ângulo de incidência do feixe (adaptado da ref. [2]).

Uma lente electrostática produz imagens de aberturas físicas que definem o feixe. Portanto é coerente afirmar que o seu dimensionamento também pode ser feito em termos destas janelas e pupilas.

Em óptica, a relação entre a ampliação linear e angular perante uma interface esférica, designada por lei de Helmholtz-Lagrange, pode ser escrita da seguinte forma:

$$n_1 r_1 \tan \alpha_1 = n_2 r_2 \tan \alpha_2 \quad (2.3)$$

Em que  $r_1$  e  $r_2$  são as dimensões do objecto e imagem,  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refacção onde se encontram o objecto e imagem,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , o ângulo do feixe antes e depois de passar pela lente. Em óptica de PC a lei relaciona as seguintes quantidades:

$$r_1 \theta_1 V_1^{1/2} = r_2 \theta_2 V_2^{1/2} \quad (2.4)$$

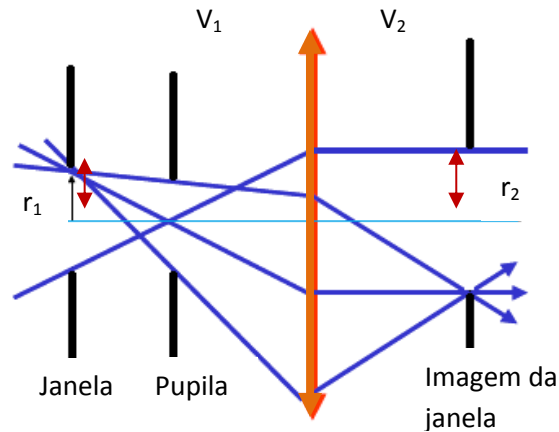
Para  $\theta \ll 1$  tal que  $\tan \theta \approx \theta$ . Reescrevendo a expressão, pode chegar-se à relação apresentada na equação 2.5.

$$M_l M_\alpha = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Com  $M_l$  e  $M_\alpha$  a ampliação linear e angular, respectivamente. Esta relação pode ser obtida usando a equação do movimento paraxial para PC e escolhendo apenas dois raios paraxiais que a satisfaçam, de modo a obter a solução geral.

O que esta equação traduz é que a lente produz uma imagem da janela e o tamanho dessa imagem é determinado pela ampliação da lente. Quando o potencial varia de  $V_1$  para  $V_2$ , ocorre uma variação na energia do feixe, o que afecta o seu ângulo de saída e a sua extensão angular. Isto pode ser minimizado se colocarmos uma pupila no foco da lente produzindo um feixe com um ângulo  $\alpha_2 = 0$ . Assim a extensão angular vai depender apenas do ângulo de lápis.

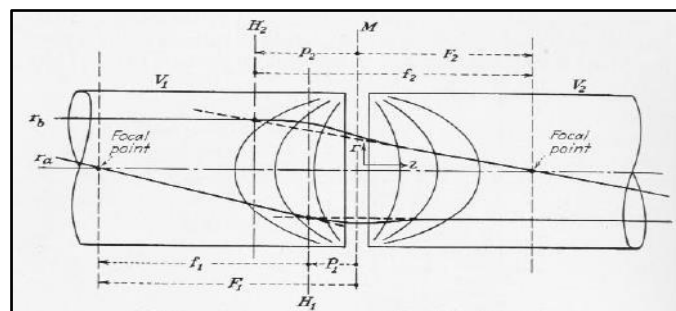
Uma vez determinado este ângulo num ponto do sistema óptico pelas aberturas físicas, sabe-se segundo a lei de Helmholtz-Lagrange, o ângulo em qualquer ponto. Na maioria dos sistemas ópticos o ângulo de lápis é bastante pequeno (aproximação paraxial).



**Figura 2.4.** A figura mostra como usar a pupila, ao colocá-la no foco da lente para criar uma imagem no infinito. Dessa forma o ângulo do feixe é nulo – tem-se um feixe coerente (imagem adaptada da ref. [2]).

### 2.1.3. Pontos cardeais

As dimensões de uma lente electrostática são, geralmente, comparáveis às suas distâncias focais sendo por esse motivo representada como uma lente espessa. Contudo, algumas lentes compostas por discos com aberturas cilíndricas e muito próximas entre si, podem ser representadas como lentes delgadas além de fornecerem, numa primeira abordagem, uma boa aproximação do que se espera obter.



**Figura 2.5.** Representação dos pontos cardeais de uma lente electrostática.  $H_1$  e  $H_2$  são os planos principais e  $M$  o plano de simetria da lente. É possível observar outros pontos tais como: os focos  $F_1$  e  $F_2$ , as suas distâncias focais,  $f_1$  e  $f_2$ , respectivamente. A título exemplificativo também se podem observar dois raios paraxiais. Adaptado da ref. [4].

A lente é representada pelos seus pontos cardeais que consistem em dois pares de pontos localizados ao longo do eixo óptico da lente, nomeadamente, os pontos principais ou planos principais, e os pontos focais. Na figura 2.5 pode-se observar que todos os pontos cardeais

tomam como referência o plano de simetria da lente. As mesmas regras da geometria paraxial aplicadas à luz podem ser usadas de igual modo para desenhar as trajetórias das partículas como se pode observar na figura 5.

Algumas relações úteis podem ser obtidas geometricamente a partir da lente espessa e que se aplicam a lentes electrostáticas, tais como:

$$M_\alpha = \frac{f_1 - p}{f_2} = \frac{f_1}{f_2 - q} \quad M_l = \frac{f_2 - q}{f_2} = \frac{f_1}{f_1 - p} \quad (2.6 \text{ e } 2.7.)$$

Onde  $f$  se refere à distância focal e  $q$  à distância da imagem. Para uma imagem real,  $M_l$  é negativa, mas por convenção referimo-nos à ampliação como sendo positiva. Para lentes muito finas e pouco robustas,  $f_1 \approx f_2 \approx f$ . Dado que  $M_l$  é igual à razão dos tamanhos do objecto e imagem, usando a equação 2.7 obtém-se a equação de Gauss:

$$\begin{aligned} M_l = \frac{f - q}{f} = -\frac{q}{p} &\Leftrightarrow 1 - \frac{q}{f} = \frac{q}{p} \Leftrightarrow q \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{p} \right) = 1 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Partindo novamente da igualdade da equação 2.7 obtém-se a relação de Newton.

$$x_0 x_i = f^2 \quad (2.9)$$

Em que  $x_0 = f_1 - p$ , corresponde à distância do objecto ao 1º foco, e  $x_i = f_2 - q$  corresponde à distância do 2º foco à imagem. Esta relação toma a forma apresentada na equação 2.10, para lentes espessas.

$$\frac{f_1}{p} + \frac{f_2}{q} = 1 \quad (\text{Eq.2.10.})$$

#### 2.1.4. Equação do movimento paraxial [5]

Para lentes com simetria cilíndrica utilizam-se coordenadas cilíndricas, considerando o eixo  $z$  o eixo de simetria do sistema de lentes. A equação de Laplace, para este tipo de simetria, toma a forma da equação 2.11.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad (\text{Eq.2.11})$$

As componentes, axial e radial, do campo eléctrico podem ser escritas em função do potencial da seguinte forma:

$$E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{r}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \quad (2.12. \text{ e } 2.13)$$

Considerando apenas raios paraxiais, nestas condições, a velocidade axial é sempre muito maior que a velocidade radial pelo que podemos descrever a energia total da partícula como,

$$\frac{1}{2} m \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 + qV = 0 \quad (2.14)$$

Para a descrição do movimento radial tem-se,

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = q E_r = q \frac{r}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (2.15.)$$

De modo a eliminar-se a variável  $t$  da equação escrevemos usando a regra da função composta, obtendo-se a equação 2.16.

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{dz}{dt} \frac{d}{dz} \left( \frac{dz}{dt} \frac{dr}{dz} \right) \quad (2.16)$$

Substituindo a equação 2.10 e a equação 2.8 na equação 2.9 obtém-se,

$$\left( \frac{-2qV}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{d}{dz} \left[ \left( \frac{-2qV}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{dr}{dz} \right] = \frac{qr}{2m} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \Leftrightarrow \quad (2.17)$$

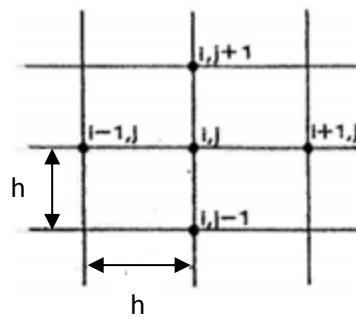
$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{1}{2V} \frac{dV}{dz} \frac{dr}{dz} = - \frac{r}{4V} \frac{d^2 V}{dz^2} \quad (2.18)$$

Esta última equação é válida para qualquer partícula carregada porque não depende de parâmetros como a massa ou carga, dependendo apenas do potencial a que a partícula está sujeita. De modo a integrar a equação (2.14), é necessário conhecer o potencial ao longo do eixo Oz do sistema de lentes, o que se faz por recorrência à lei de Laplace.

### 2.1.5. Determinação de linhas equipotenciais [5]

#### *Método das diferenças finitas. Lei de Laplace*

O método das diferenças finitas é um dos métodos mais simples para determinar a distribuição do potencial electrostático. Neste método, o espaço ocupado pelos eléctrodos não é tratado como contínuo, mas sim como uma rede de pontos discretos. O potencial de todos os pontos é obtido usando uma aproximação numérica da equação de Laplace, fazendo uso dos potenciais conhecidos nos pontos de contorno. A interpolação é utilizada para encontrar o potencial em qualquer ponto intermediário.



**Figura 2.6.** Representação esquemática de uma malha computacional envolvendo cinco pontos.

Considere-se uma rede de pontos separados entre si por uma distância  $h$ . O potencial em torno do ponto  $(z,r)$  pode ser escrito da seguinte forma:

$$V(z, r+h) = V(z, r) + h \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + O(h^3) \quad (2.19)$$



Recorrendo à expansão em série de Taylor, até ao termo de segunda ordem (pois os restantes já são muito próximos de zero), verifica-se também que,

$$V(z + h, r) + V(z - h, r) - 2V(z, r) = h^2 \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (2.20)$$

$$V(z, r + h) + V(z, r - h) - 2V(z, r) = h^2 \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \quad (2.21)$$

$$V(z, r + h) - V(z, r - h) = 2h \frac{\partial V}{\partial r} \quad (2.22)$$

Substituindo na equação (2.19) as expressões das equações (2.20), (2.21), e (2.22), obtém-se:

$$V(z, r) = \frac{1}{4} [V(z + h, r) + V(z - h, r) + V(z, r + h) + V(z, r - h)] + \frac{h}{8r} [V(z, r + h) - V(z, r - h)] \quad (2.23)$$

Observando o último termo desta equação pode-se constatar que esta equação não é aplicável a pontos que se situem sobre o eixo de simetria. Para contornar isso, utilizam-se não 5 mas 6 pontos, 4 localizados num plano perpendicular ao eixo mais um ponto de cada lado do ponto que se pretende calcular o potencial.

$$V(z, 0) = \frac{1}{6} [V(z + h, 0) + V(z - h, 0) + 4V(z, h)] \quad (2.24)$$

## SIMION

SIMION é o programa mais usado no cálculo de potenciais electrostáticos, tendo por base o método das dízimas finitas para calcular o potencial electrostático. Possui *software* de simulação para criação de sistemas ópticos. A versatilidade e o poder do SIMION permitem a simulação de uma grande variedade de sistemas, independentemente da sua complexidade.

Existem diversas funcionalidades neste programa. O utilizador pode desenhar os eléctrodos em SIMION, especificar a sua geometria, seja ela planar ou cilíndrica, e definir os potenciais nos eléctrodos desenhados. O programa usa o sistema dos cinco pontos e possui uma rede composta até 16000 pontos.

Outros parâmetros podem ser definidos pelo utilizador tais como energia da partícula, sua dispersão, ângulo de divergência e geometria da fonte.

As linhas equipotenciais são desenhadas e as trajectórias, tanto dos electrões como dos iões, podem ser observadas. As trajectórias são observadas num espaço tridimensional. Aberrações esféricas podem, portanto, ser observadas variando os ângulos de incidência do feixe ao atravessar um sistema de lentes.

## 2.2. Lentes electrostáticas

Eléctrodos com simetria axial produzem campos electrostáticos cujas superfícies equipotenciais possuem formas semelhantes a uma lente. A partícula ao passar por estas superfícies é acelerada ou retardada curvando a sua trajectória e exibindo uma capacidade de

focalização. Esta geometria torna bastante fácil a concepção deste tipo de lentes. Este tipo de simetria é apropriado para feixes cilíndricos.

### 2.2.1. Geometria de lentes

Os dois tipos mais comuns de lentes electrostáticas são as lentes cilíndricas e os discos de abertura circular. As propriedades focais das lentes dependem do número de eléctrodos que a compõem, assim como das suas dimensões e tensões aplicadas. Lentes cilíndricas tendem a ser mais robustas e produzem menos aberrações que os discos [5].

De modo geral, quanto mais eléctrodos tiver uma lente, maior controlo se possui sobre as suas propriedades focais. É feita uma breve discussão somente sobre lentes cilíndricas, que são as mais utilizadas, embora os mesmos princípios se apliquem a lentes compostas por discos de abertura circular.

#### *Lentes de dois elementos*

As lentes compostas por apenas 2 eléctrodos são bastante utilizadas para focalizar partículas carregadas com energias desde alguns eV até vários keV [6]. As tensões são aplicadas nos dois eléctrodos consoante a energia inicial e a energia final que se pretende.

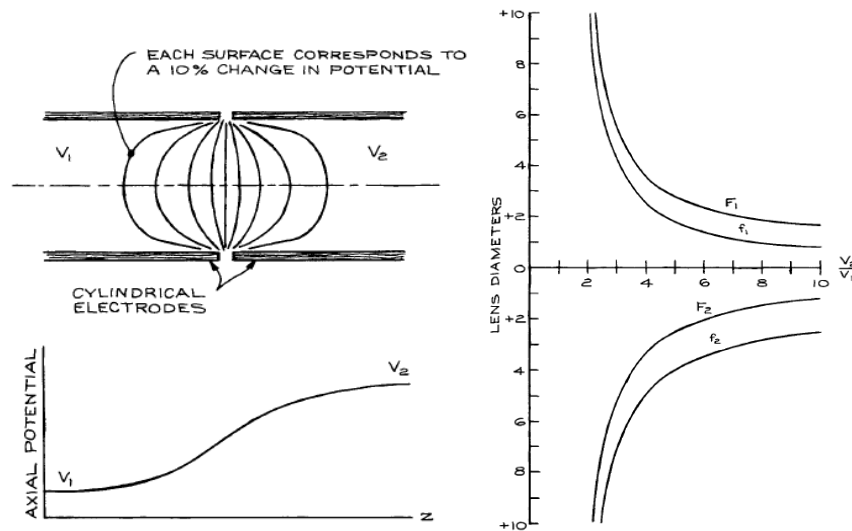
As suas propriedades focais dependem do diâmetro dos cilindros, do espaçamento entre eles e da razão entre as tensões aplicadas em ambos os eléctrodos. Isto é aplicável a todas as lentes com 2 ou mais elementos. Todas as propriedades focais das lentes variam proporcionalmente com o diâmetro, pelo que neste tipo de lentes todas as dimensões são cotadas em unidades de diâmetro, D.

Em relação ao espaçamento entre os eléctrodos, se este for grande, as propriedades focais tornam-se sensíveis à espessura dos cilindros, e campos externos podem perturbar as linhas de campo no interior da lente. A maioria das lentes é construída com um espaçamento de 0,1D [7].

Nestas lentes de dois elementos, a energia das partículas depende das tensões aplicadas nos eléctrodos. As tensões são aplicadas, tendo sempre como referência a tensão aplicada na fonte de partículas de modo que:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{E_2}{E_1} \quad (2.24)$$

As propriedades focais são normalmente representadas na forma de gráficos ou tabelas em que as respectivas distâncias focais vêm em função da razão  $V_2/V_1$ .



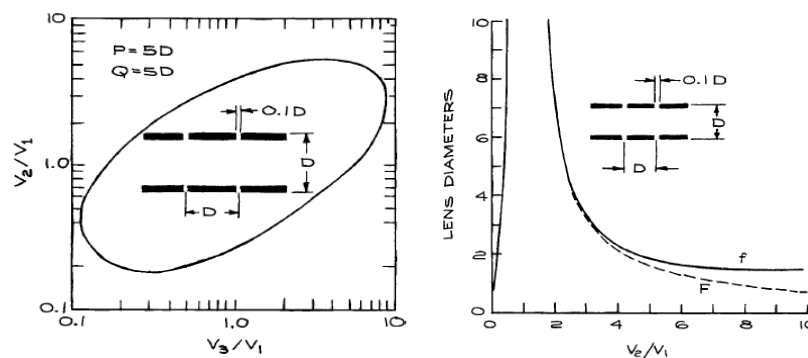
**Figura 2.7.** Dados obtidos através de soluções numéricas da equação do movimento de um electrão atravessando uma lente cuja precisão é estimada entre 1 a 3%. Adaptado da ref. [7].

### Lentes de três elementos

Quando se têm três eléctrodos cujos espaçamentos entre si são muito pequenos, há sobreposição dos campos eléctricos produzidos por ambos e considera-se todo o conjunto como uma única lente.

Uma lente com três elementos cujas energias, inicial e final do feixe diferem, designa-se de lente assimétrica. Este tipo de lentes pode ser usado para produzir um feixe de electrões ou iões com energia variável.

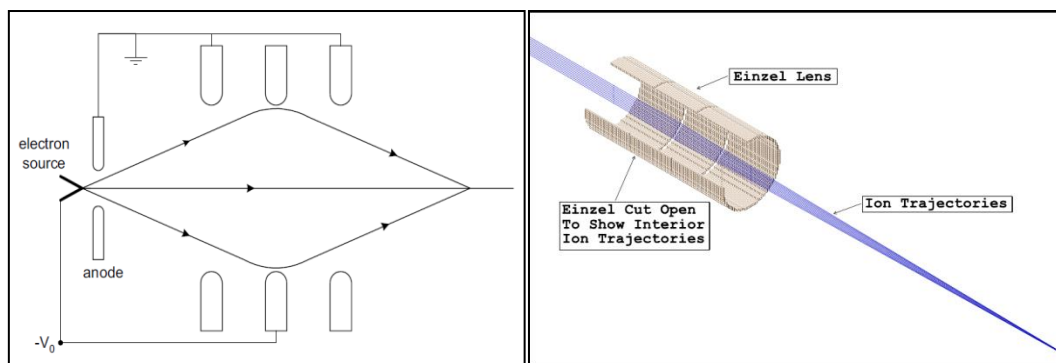
As propriedades focais destas lentes, visto se relacionarem com duas variáveis independentes, são apresentadas em gráficos, em função da razão  $V_2/V_1$  ou  $V_3/V_1$ . Existem na literatura, dados referentes às propriedades focais de lentes de três elementos. Esses dados são apresentados graficamente em função dos rácios mencionados anteriormente.



**Figura 2.8.** Propriedades de uma lente assimétrica (à esquerda), e de uma lente *Einzel* (à direita). Adaptado da ref. [7].

### Lentes Einzel

Ao se aplicar uma tensão ao eléctrodo central e, se se colocar os outros dois ao mesmo potencial, obtém-se uma lente *Einzel*, ou lente unipotencial, pois as partículas entram e saem com a mesma energia. As suas propriedades focais são simétricas, isto é,  $f_1 = f_2$ .



**Figura 2.9.** À esquerda, a representação da emissão de electrões, acelerados por um potencial  $V_0$  e focalizados por lente *Einzel* composta por três discos de abertura circular [8]. À direita, a focalização de um feixe de iões simulado em ambiente SIMION [9].

Existem dois modos de focalização: modo de aceleração e desaceleração. Em modo de desaceleração tem-se que  $V_2/V_1 < 1$ , enquanto no modo de aceleração tem-se  $V_2/V_1 > 1$ . O modo de aceleração, para várias aplicações, é o mais utilizado pois no modo de desaceleração o feixe tende a expandir a sua área transversal o que dependendo das dimensões da lente, pode originar aberrações esféricas [7].

### **Lentes de quatro ou mais elementos**

A ampliação numa lente de três elementos, de um modo geral, só pode ser controlada através do dimensionamento dos comprimentos dos eléctrodos cilíndricos, que têm valores específicos. Isso torna a capacidade de ampliação bastante limitada.

Para se aumentar a capacidade de ampliação da lente, um 4º elemento é adicionado. O grau de ampliação é então controlado fazendo variar as tensões aplicadas nos eléctrodos centrais, independentemente da razão entre as tensões do primeiro e último elemento. Aumentando o comprimento dos elementos centrais consegue-se um maior controlo sobre os graus de ampliação. Mas um método mais eficaz é acrescentando um quinto elemento no meio da lente, servindo de espaçador entre os elementos centrais, responsáveis pelas propriedades focais da lente [5].

### **Lentes afocais**

Num sistema de lentes composto por 5 elementos, pode-se considerar (se o elemento central tiver dimensões comparáveis às distâncias focais do sistema) como dois conjuntos de lentes de três elementos em que o eléctrodo central é comum aos dois conjuntos. Ao se atribuir um determinado comprimento ao elemento central de tal modo que a distância focal,  $f_2$ , da primeira lente coincida com a distância focal,  $f_1'$ , da segunda lente, tem-se um sistema afocal.

Num sistema afocal, todos os raios que entrem paralelamente ao eixo de simetria da lente, sairão da mesma forma, com o foco no infinito. Outra característica deste sistema diz respeito ao grau de ampliação que não depende da posição do objecto. Qualquer que seja a distância a que se encontra o objecto, a imagem terá sempre o mesmo tamanho.

Para manter o sistema afocal a seguinte condição tem que ser mantida [5]:

$$2(F_2 - F_1) = \text{constante} \quad (2.24)$$

Sendo as duas lentes idênticas tem-se ainda que,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_4}{V_3} \quad e \quad \frac{V_3}{V_1} = \frac{V_5}{V_3} \quad (2.25 \text{ e } 2.26)$$

O que nos conduz à expressão da equação (2.27). Usando a equação(2.26) obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{V_3}{V_1} = \frac{V_5}{V_3} \Leftrightarrow \frac{V_3^2}{V_1} = V_5$$

Se multiplicar o segundo membro por  $V_1/V_1$  obtém-se a equação (2.27):

$$\begin{aligned} \frac{V_3^2}{V_1} = V_5 \frac{V_1}{V_1} &\Leftrightarrow \left(\frac{V_3}{V_1}\right)^2 = \frac{V_5}{V_3} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{V_3}{V_1} = \left(\frac{V_5}{V_3}\right)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.27)$$

De acordo com a lei de Helmholtz-Lagrange, para lentes iguais, obtém-se que:

$$M_l = M_\alpha = \left(\frac{V_5}{V_1}\right)^{-1/4} \quad (2.28)$$

Este tipo de lentes, devido às suas características, é adequado para a produção de um feixe de partículas bem definido.

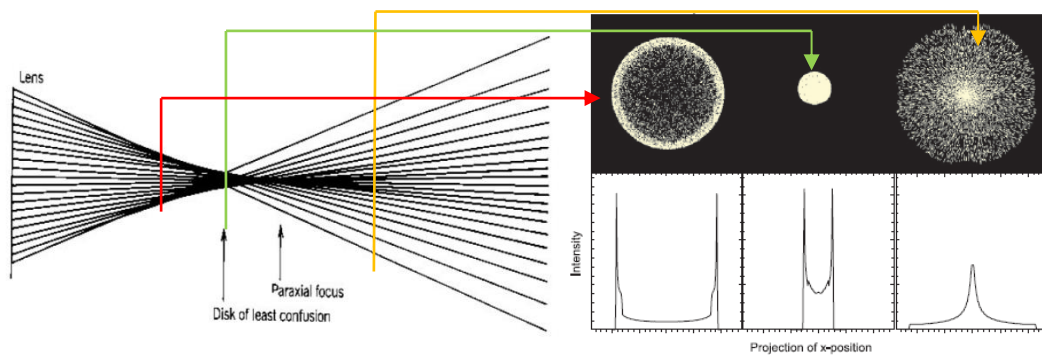
Se a condição da equação (2.24) não for satisfeita, o sistema deixa de ser afocal, e volta a ter o comportamento descrito para o sistema de 4 elementos. Contudo, o alcance nos graus de ampliação é substancialmente maior [5].

## 2.3. Aberrações em lentes electrostáticas

O estudo das aberrações é importante no dimensionamento de um sistema de lentes, simples ou complexo. Existem 3 tipos de aberrações:

- i) Aberrações esféricas, relacionadas com os desvios angulares que as partículas sofrem onde a teoria paraxial já não é válida;
- ii) Aberrações cromáticas, causadas por variações da energia cinética das partículas transmitidas;
- iii) Efeito da carga espacial, devido às forças repulsivas que se fazem sentir entre as partículas que compõem o feixe.

As aberrações esféricas são observadas quando as trajectórias das partículas se afastam do eixo óptico. Tal como numa lente “normal”, o foco para os raios de luz que passam perto do eixo óptico, será diferente do foco daqueles que passam mais afastados. Isto é ilustrado na figura 2.10.



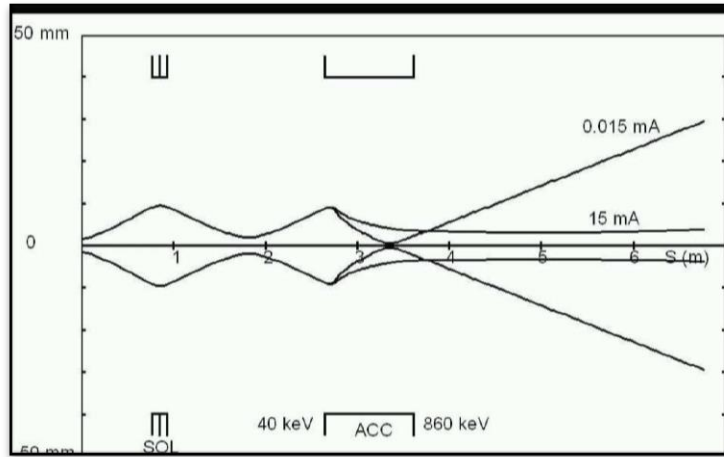
**Figura 2.10.** Distribuição de um feixe de electrões em diferentes planos após a passagem por uma lente electrostática de dois elementos. Os raios paraxiais encontram-se focados no plano de Gauss. Os raios com maior ângulo de entrada possuem um foco mais próximo da lente. O disco de confusão mínima é onde o feixe possui um menor diâmetro. Adaptado da ref. [10].

Quando um feixe de luz branca atravessa uma lente, a variação do comprimento de onda (c.d.o.),  $\lambda$ , faz variar o índice de refração, observado-se aberrações cromáticas. No caso de um electrão ou ião, o c.d.o. depende do momento linear (de acordo com a relação de De Broglie), e consequentemente, da energia cinética,  $E_c$ . Se o feixe produzido for composto por PC com energias diferentes, estas são focadas a diferentes distâncias da lente. Forma-se um disco de confusão cromática.

A dispersão de energia do feixe pode ter várias origens:

- I. As partículas são emitidas da fonte com diferentes energias. Por exemplo, no caso de emissão termoelectrónica os electrões terão uma dispersão em energia de  $kT$  (onde  $T$  é a temperatura da superfície emissora e  $k$  a constante de Boltzmann);
- II. Flutuações na tensão de aceleração. As fontes de tensão fornecem um sinal bastante estável mas há sempre um pequeno desvio assim como alguma oscilação na tensão aplicada;
- III. Colisões inelásticas, em que não havendo conservação de energia cinética do sistema, contribuem bastante para perda de energia do feixe.

O efeito de carga espacial deve ser tido em conta principalmente em feixes de baixa energia cinética e densidades de corrente elevadas. As forças repulsivas que se fazem sentir entre as partículas carregadas fá-las afastarem-se umas das outras dispersando o feixe. Além disso, os iões exteriores blindam o feixe interno através de um potencial repulsivo diminuindo a sua energia.



**Figura 2.11.** Simulação de feixes pulsados de prótons, a baixas e altas correntes, com o PSI Graphic Transport Framework. Neste exemplo, um feixe de prótons de alta corrente (15mA), com uma energia de 40keV deixa a fonte de iões. Para comparação, um feixe de baixa corrente (0,015mA) também é mostrado. Um solenóide é usado para reorientar o feixe originando uma cintura entre o solenóide e o tubo acelerador. Adaptado da ref. [11].

## 2.4. Analisadores de energia [7]

É possível determinar a energia de um feixe de PC através do potencial necessário para o repelir por completo na direcção oposta, ou através do grau de deflexão do feixe na presença de um campo eléctrico e/ou magnético. Como é mais fácil controlar campos eléctricos, os analisadores do tipo electrostático são os mais comuns. Abaixo referem-se alguns analisadores electrostáticos.

### 2.4.1. Analisadores de deflexão de placas paralelas

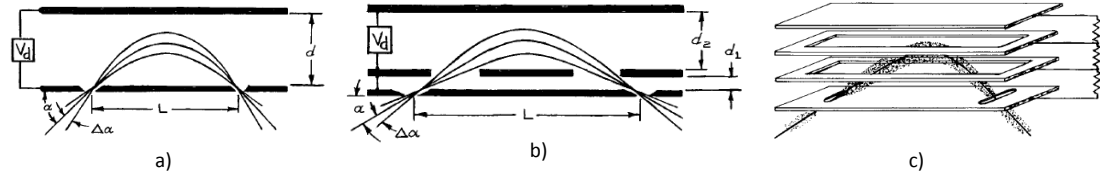
Trata-se de um dos analisadores mais simples e que consiste em duas placas paralelas, entre as quais se aplica um campo eléctrico uniforme de modo a deflectir as partículas. Ambas as fendas de entrada e saída localizam-se numa das placas. O potencial de deflexão relaciona-se com a energia, com o espaçamento entre as placas,  $d$ , e com a distância entre as fendas (para um ângulo de deflexão de  $45^\circ$ ), da seguinte forma:

$$V_d = (E/q) \frac{2d}{L}, \left(d > \frac{L}{2}\right) \quad (2.29)$$

A condição  $d > L/2$  serve para evitar que as partículas colidam com as placas. Quando as placas estão colocadas numa região isolada de campos eléctricos externos, obtém-se um melhor desempenho para um ângulo de incidência igual a  $30^\circ$ .

Os problemas neste tipo de analisadores relacionam-se com as aberrações que ocorrem nas fendas cuja placa se encontra na fronteira com campos eléctricos fortes. Estas fendas funcionarão como lentes (efeito divergente, semelhante a uma lente convexa). Porém, estes efeitos podem ser atenuados colocando uma rede nas fendas de modo a corrigir essas perturbações no campo. Outro dos problemas diz respeito ao potencial de deflexão que geralmente é grande. É necessário nestes analisadores conter esses campos do aparelho onde o analisador será instalado e evitar que esse campo penetre na região de deflexão (devido a perturbações nos bordos da placa). Para resolver isso, ou se aumenta o comprimento das

placas ou se acrescentam eléctrodos para anular essas perturbações que ocorrem nos bordos das placas (fig. 2.12).



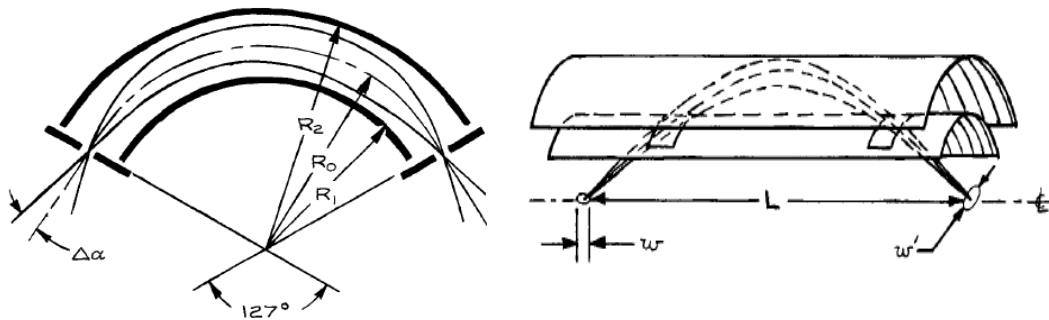
**Figura 2.12.** (a) Esquema de um analisador de placas paralelas; (b) Esquema de um analisador de energia de placas paralelas cujas fendas se encontram isoladas de campos externos; (c) Esquema de um analisador de placas paralelas com eléctrodos auxiliares que “cortam” as perturbações do campo nos bordos das placas. Adaptado da ref. [7].

## 2.4.2. Analisadores Cilíndricos

Existem dois tipos de analisadores cilíndricos: analisadores radiais, e de espelhos cilíndricos. Nos analisadores radiais é aplicado um campo eléctrico de modo que a partícula percorra os eléctrodos numa trajectória circular de raio  $R_0$ .

$$V_{\text{exterior}} = V \left( 1 - 2 \ln \frac{R_2}{R_0} \right) \quad V_{\text{interior}} = V \left( 1 - 2 \ln \frac{R_1}{R_0} \right) \quad (2.30 \text{ e } 2.31)$$

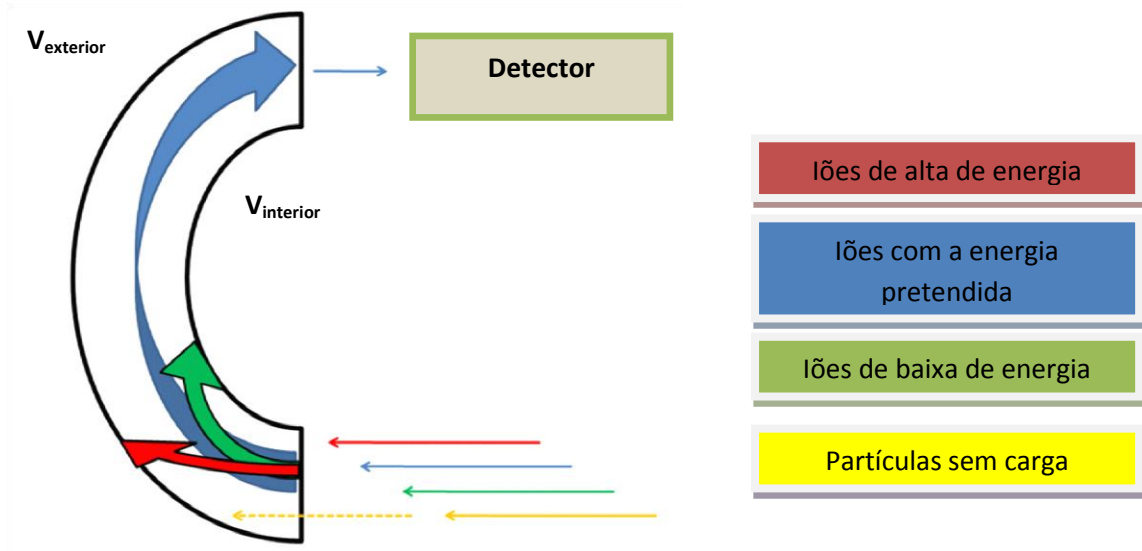
Os analisadores de espelhos cilíndricos funcionam de modo semelhante ao analisador de placas paralelas, excepto o facto de que a deflexão se dá coaxialmente. Estes analisadores focam dentro de um determinado ângulo sólido, ou seja, focam em diferentes planos da trajectória da partícula.



**Figura 2.13.** Esquema de Analisador radial (à esquerda) e analisador de espelhos cilíndricos (à direita). Adaptado da ref. [7].

Outros analisadores que focalizam em diversos planos são os analisadores esféricos ou semiesféricos que possuem uma maior resolução, s. Tal poder focal é conseguido através da aplicação de um potencial produzido por dois eléctrodos esféricos concêntricos. Os mais usados são os analisadores semiesféricos por serem mais compactos visto que deflectem o feixe de  $180^\circ$ .





**Figura 2.14.** Esquema de um analisador semiesférico (adaptado de imagem de [12]).

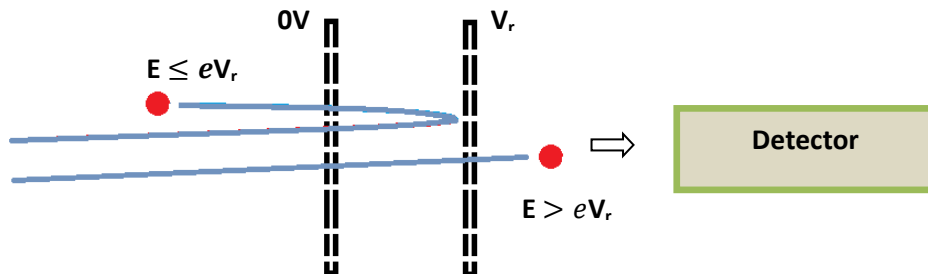
Os potenciais aplicados aos eléctrodos interior e exterior obedecem às seguintes expressões:

$$V_{exterior} = V \left( 2 \frac{R_0}{R_2} - 1 \right) \quad (2.32)$$

$$V_{interior} = V \left( 2 \frac{R_0}{R_1} - 1 \right) \quad (2.33)$$

### 2.4.3. Analisadores de retardamento

Este método é muito simples e passa pela colocação de uma rede em frente do detector. A corrente no detector corresponde ao número de iões que excedem, em energia, o potencial definido na rede,  $V_r$ . A corrente no colector varia conforme se varia o potencial aplicado. Para análise da dispersão de energia do feixe, é necessário diferenciar-se a corrente obtida no colector em função da tensão de retardamento. O sinal obtido assemelha-se a uma curva gaussiana cuja largura a meia altura fornece o valor de dispersão em energia. Este tipo de analisadores são compactos e fáceis de construir, e apenas algumas considerações têm que ser tomadas de modo a garantir-se uma boa resolução.



**Figura 2.15.** Esquema mostrando o funcionamento de um analisador de retardamento.

Existem, contudo, algumas desvantagens neste tipo de analisadores e que devem ser tidos em conta quando se dimensionam e constroem. Aquando o dimensionamento e a respectiva construção, deve-se ter em conta que apenas uma componente da velocidade das partículas

sofrerá a força exercida pelo campo eléctrico. Portanto, o tamanho da área transversal assim como o grau de dispersão angular do feixe influenciará o desempenho do analisador. Para feixes de baixa energia, este tipo de analisadores é bastante afectado por efeitos de carga espacial e campos electromagnéticos externos. Para altas energias, deflectir PC apenas por campos eléctricos requer tensões elevadas. Por esse motivo, são utilizados antes (ou em conjunto), campos magnéticos.

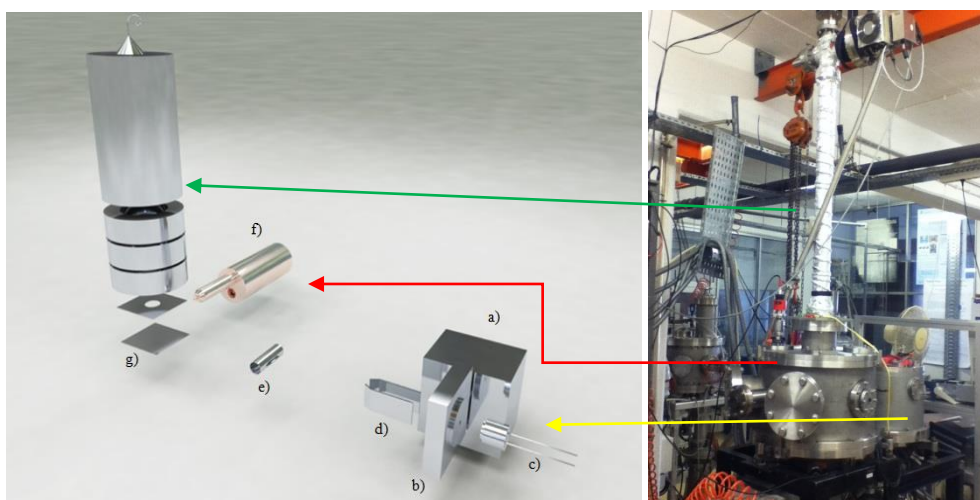
Para efeitos desta dissertação, foi desenvolvido e implementado um analisador de retardamento face à sua simplicidade, fácil construção e pelo espaço que ocupa. Conseguem-se resoluções na ordem dos 0,1% para energias perto dos 100eV, e que servem o propósito no âmbito deste tema. Tanto os analisadores esféricos como cilíndricos costumam ser um pouco volumosos e robustos, assim como bastante caros. Para os desvios que se pretendem medir (que se espera que sejam em cerca de 0,5%), e tendo em conta que são feixes de baixa energia, a construção de um analisador de retardamento puramente electrostático é a solução.

### 3. Equipamento Experimental

Neste capítulo apresenta-se a descrição e o enquadramento do equipamento experimental onde será montado o analisador de dispersão em energia do feixe neutro de potássio. Este equipamento experimental faz parte da classe de feixes cruzados, situado no Laboratório de Colisões Atómicas e Moleculares (LCAM), da linha 2 do CEFITEC.

O funcionamento de um aparelho de feixes cruzados, consiste na produção de um feixe de potássio neutro que cruza ortogonalmente com um feixe molecular. Neste caso, a fragmentação da molécula alvo, dá-se após transferência de electrão, do átomo de potássio para a molécula receptora de electrão. Os fragmentos iónicos formados são analisados por espectrometria de massa do tipo tempo de voo, ToF.

O aparelho é composto por 2 câmaras de alto vácuo: a câmara de produção do feixe potássio neutro, e a câmara de colisões. O alto vácuo é garantido por um sistema de bombas difusoras. As câmaras estão ligadas entre si por uma válvula inter-câmaras que permite o isolamento entre ambas.

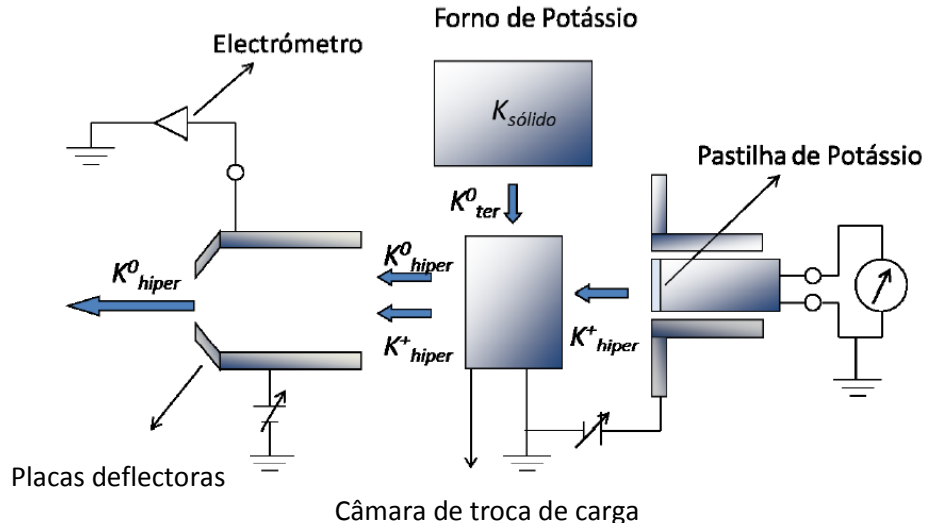


**Figura 3.1.** a) forno de potássio neutro; b) câmara de troca de carga; c) fonte de iões de potássio; d) placas de deflexão; e) detector de Langmuir-Taylor; f) forno de moléculas; g) Espectrómetro de massa (ToF) [13], [14].

#### 3.1. Câmara de produção de feixe de potássio neutro

##### 3.1.1. Sistema de troca de carga

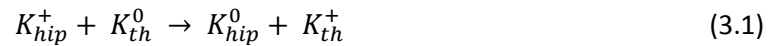
É no sistema de troca de carga que é criado um feixe neutro de átomos de potássio hipertérmico. Este sistema consiste numa fonte de iões de potássio hipertérmicos,  $K^+_{\text{hip}}$ , um forno de potássio sólido (acoplado a uma câmara de troca de carga), e um conjunto de placas deflectoras.



**Figura 3.2.** Esquema da câmara de troca de carga [14].

A fonte de íons de  $K^+$  hipertérmicos (ou pastilha de potássio) é aquecida através de um filamento por onde se faz passar uma corrente (tipicamente de 2,2 A e uma queda de tensão de 8,0 V), esquematicamente representado na fig. 3.2, e por aplicação de uma diferença de potencial entre esta e a câmara de troca de carga, obtém-se um feixe iónico.

No forno, o potássio sólido é aquecido até uma temperatura de 420K vaporizando-o. É no interior da câmara de troca de carga que os íons de  $K^+$  hipertérmicos recebem um electrão dos átomos neutros  $K^0$  térmicos. Dá-se uma troca de carga ressonante (Eq.3.1) isto é, toda a energia dos  $K_{hip}^+$  é transferida para os  $K_{th}^+$ . O resultado é um feixe de átomos de potássio neutro hipertérmico à saída da câmara de troca de carga.



Nem todos os íons  $K_{hip}^+$  vão interagir com os átomos de potássio. Assim, para garantir que se obtém um feixe composto unicamente por átomos neutros de potássio, imediatamente depois da câmara de troca de carga encontram-se as placas deflectoras que servem para deflectir todos os íons que a atravessam. A este par de placas dá-se o nome de “tira-íons”.

A temperatura da câmara de troca de carga (440K) é superior à do forno de modo a garantir que não haja condensação de potássio no seu interior. A câmara de troca de carga possui duas aberturas, ambas com um diâmetro de 1mm. Tanto o forno como a câmara, são aquecidas por meio de duas resistências cujo controlo e monitorização passa por um controlador PID de temperatura (*Proportional-integrator-derivative*).

### 3.1.2. Placas deflectoras de íons ou “Tira-íons”

Existem duas placas com a geometria e dimensões que se podem observar esquematicamente na figura 3.2, polarizadas de modo a deflectir todas as partículas portadoras de carga.

Uma das placas é a placa colectora onde os íons  $K^+$  vão ser colectados. Esta está ligada a um electrómetro permitindo a medição de corrente iónica.

## 3.2. Câmara de colisões

### 3.2.1. Detector de ionização do tipo Langmuir-Taylor

Este detector tem como objectivo a monitorização da corrente de átomos de potássio que chega à zona de colisões. Consiste num colector cilíndrico atravessado por um filamento ionizador de Iridio no seu interior (0,125mm de espessura, pureza > 99%) (fig. 3.3). Possui duas aberturas transversais de modo a permitir a passagem do feixe.

O filamento está localizado acima das aberturas de modo a não interferir com a direcção principal do feixe. Para medir a intensidade do feixe de potássio neutro hipertérmico, aplica-se uma corrente de 630mA no filamento e uma diferença de potencial de +60V no colector cilíndrico. Ligando o colector a um electrómetro pode-se monitorizar a corrente iónica, corrente essa proporcional à intensidade do feixe de átomos de potássio.

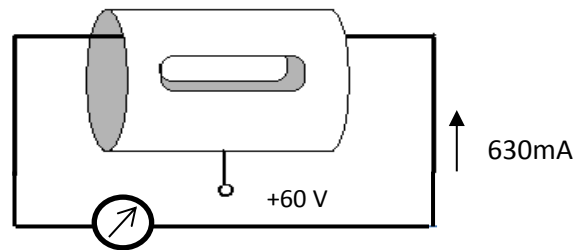


Figura 3.3. Detector Langmuir-Taylor[13].

### 3.2.2. Forno de moléculas sólidas

Consiste numa estrutura cilíndrica em cobre, com uma abertura de 1mm de diâmetro, onde se colocam as amostras sólidas a aquecer para gerar um feixe efusivo de moléculas neutras. O controlo de temperatura é efectuado com o recurso a um termopar do tipo K, com uma junção cromel-alumel.

## 3.3. Sistema de vácuo

O sistema de vácuo é constituído por três bombas rotatórias, duas bombas difusoras e uma bomba turbomolecular. Cada câmara tem associada uma bomba rotatória de 2 estágios e uma bomba difusora de modo a obter-se uma pressão de trabalho da ordem dos  $10^{-7}$  mbar ( $10^{-5}$  Pa) (alto-vácuo). O alto-vácuo permite aumentar o livre percurso médio de tal modo que se garanta que a colisão acontece apenas entre o átomo de potássio e a molécula. Tipicamente o livre percurso médio neste sistema é de cerca de:

$$\lambda \cong \frac{7 \times 10^{-3}}{P_{\text{trabalho}}} \text{ (cm)} \cong 35 \text{ m} \quad (3.2)$$

A zona onde se encontra o detector do tipo canaltrão (na extremidade superior do espectrómetro ToF), é bombeada por uma bomba turbomolecular e a zona de introdução de amostras por uma bomba rotatória.

### **3.3.1. Bombas rotatórias**

As bombas rotatórias são bombas puramente mecânicas e são as responsáveis por garantir um grau de vácuo primário na ordem de  $10^{-2}$  mbar (1 Pa). São utilizadas em todo o sistema três bombas rotatórias de dois estágios para bombear ambas as câmaras assim como o sistema de introdução de amostras líquidas e gasosas.

### **3.3.2. Bombas difusoras**

Uma bomba difusora consiste num invólucro cilíndrico onde no seu interior existe um vaporizador para o óleo no qual se baseia o processo de bombeamento. Sobre este invólucro existe uma chaminé que conduz o vapor aos vários andares de ejectores. O óleo vaporizado, ao sair pelos ejectores, arrasta os gases dentro da bomba para baixo e de encontro às suas paredes. As paredes são arrefecidas por circulação externa de água, levando à condensação do óleo que retorna à base da bomba voltando ao vaporizador. O gás arrastado é comprimido e extraído com o auxílio da bomba rotatória que se encontra associada. Estas bombas baixam a pressão para valores na ordem dos  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  mbar ( $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  Pa). A pressão mínima é limitada pela tensão de vapor do óleo.

A bomba difusora acoplada à câmara de produção de feixe neutro de potássio possui uma velocidade de bombeamento de 1300 l/s enquanto a que se encontra acoplada à câmara de colisões possui uma velocidade de bombeamento de 1550 l/s.

Para evitar sobreaquecimento destas bombas, elas são refrigeradas através de um circuito de arrefecimento de água.

### **3.3.3. Válvula electromagnética**

Entre cada uma das bombas rotatórias e as respectivas bombas difusoras existe uma válvula electromagnética de isolamento e um condensador (trapa de zeólitos), que previne a migração do óleo da bomba rotatória para a zona de baixa pressão (a câmara). Estes condensadores permitem grandes velocidades de bombeamento do vapor de água e de vapores de óleo provenientes da bomba rotatória devido ao seu poder de absorção.

Na figura 3.4 encontra-se esquematizado o sistema de vácuo do aparelho de feixes moleculares cruzados.

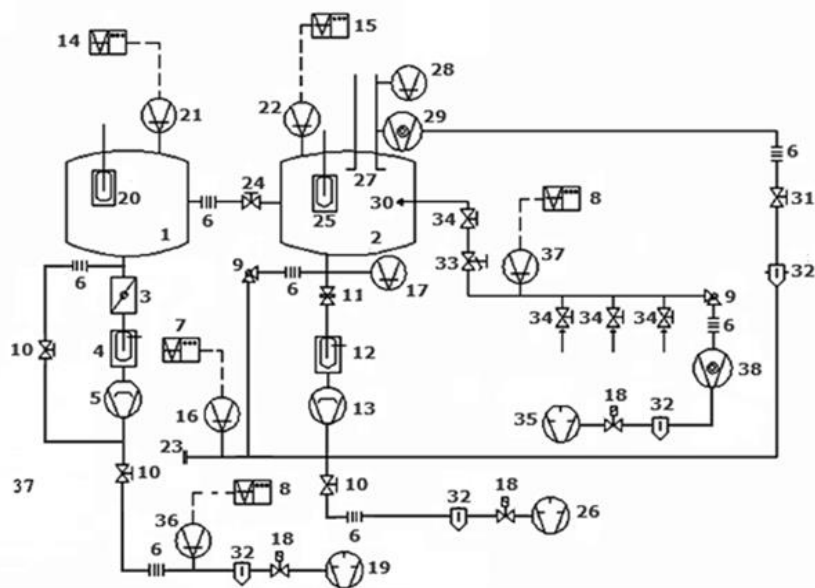


Figura 3.4. Esquema do sistema de vácuo [13].

- |  |  |   |
|--|--|---|
| 1. Câmara de potássio                    | 14. Controlador Edwards Penning 505                | 27. Espectrómetro de massa TOF                    |
| 2. Câmara de colisões                    | 15. Controlador Edwards Penning 505                | 28. Sensor de pressão Penning Balzers IKR20       |
| 3. Válvula de borboleta                  | 16. Sensor de pressão Pirani Boc Edwards APG-NW-1f | 29. Bomba turbomolecular Varian turbo-V60 high    |
| 4. Trapa de azoto líquido                | 17. Sensor de pressão Penning Balzers IKR250       | 30. Entrada bicônica                              |
| 5. Bomba difusora Edwards E06            | 18. Válvula electromagnética Edwards Speedivac     | 31. Válvula manual Leybold AG                     |
| 6. Tubo flexível em aço inoxidável       | 19. Bomba rotatória 2 estágios E2M18 Edwards       | 32. Trapa de zeólitos                             |
| 7. Controlador Boc Edwards TIC           | 20. Trapa de azoto líquido                         | 33. Válvula de safira                             |
| 8. Controlador Combivac-CM-31            | 21. Sensor de pressão Penning Edwards CP-25-EK     | 34. Válvulas manuais Swagelok                     |
| 9. Válvula de vácuo de ângulo recto      | 22. Sensor de pressão Penning Edwards CP-25-EK     | 35. Bomba rotatória 2 estágios D8B Leybold        |
| 10. Válvula manual Speedivac Edwards     | 23. Falange de ligação cega                        | 36. Sensor de pressão Pirani Leybold TR211        |
| 11. Válvula de gaveta Airco Temescal R-3 | 24. Válvula manual inter-câmaras                   | 37. Sensor de pressão Pirani Leybold TR211        |
| 12. Trapa de azoto líquido Varian 8      | 25. Trapa de azoto líquido                         | 38. Bomba turbomolecular Leybold turbovac 150cscv |
| 13. Bomba difusora Varian NRC 0184       | 26. Bomba rotatória 2 estágios E2M18 Edwards       |   |

### 3.3.4. Manómetros

O controlo do vácuo primário é efectuado por sensores do tipo *Pirani*, enquanto que na gama de alto-vácuo este é efectuado por sensores do tipo *Penning*.

#### **Sensor do tipo Pirani**

É constituído por um tubo metálico (ou vidro) e um filamento (geralmente de tungsténio ou platina), centrado longitudinalmente neste tubo. Mede-se a variação da resistência do filamento com a temperatura que ronda os 120°C. Os átomos e moléculas do gás residual, ao colidirem com o filamento, recebem energia térmica que imediatamente perdem ao chocarem com a parede do tubo. A perda de calor varia desse modo, em função do número de partículas presentes - da pressão. Os *Pirani* são usados para pressões entre a pressão atmosférica até pressões da ordem de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  mbar ( $10^{-1}$  a  $10^{-2}$  Pa) [15].

#### **Sensor do tipo Penning**

O Penning é um manómetro de ionização de cátodo frio. A ionização é produzida por uma descarga entre o cátodo e o ânodo. A presença de um campo magnético faz aumentar o percurso dos electrões, aumentando a eficiência de ionização.

A descarga ionizante é iniciada por emissão de electrões nos cátodos, provocada pela diferença de potencial entre os eléctrodos. Para pressões inferiores a  $10^{-6}$  mbar ( $10^{-4}$  Pa), o início da descarga é difícil podendo levar alguns segundos até estabelecer uma descarga estável. Devido à instabilidade da descarga estes vacuómetros podem dar leituras de pressão com erros de cerca de 5%. O intervalo de pressão em que os «Penning» são utilizados varia entre  $10^{-2}$  e  $10^{-7}$  mbar ( $10^{-1}$  a  $10^{-5}$  Pa) [15].

### 3.3.5. Bomba turbomolecular

A zona do espectrómetro de massa do tipo ToF onde se encontra o detector de partículas carregadas do tipo canaltrão, é bombeada por uma bomba turbomolecular que permite um bombeamento de base da ordem dos  $10^{-8}$  mbar ( $10^{-6}$  Pa).

As bombas turbomoleculares baseiam-se na transferência de momento linear de um rotor a grande velocidade para as moléculas de gás situadas entre o rotor e o estator conferindo-se movimento às moléculas de modo a estas saírem do sistema a bombear.

## 3.4. Espectrómetro de massa do tipo tempo de voo

O espectrómetro de massa do tipo tempo de voo, ToF, é composto por um prato de extracção, duas redes, um sistema de lentes *Einzel*, uma zona livre de campo, um detector de partículas carregadas do tipo canaltrão e possui ainda um tubo de tempo de voo com um comprimento de 1,4m. Este espectrómetro permite determinar a razão massa/carga dos iões medindo o seu tempo total de voo. Todos os iões possuem a mesma energia cinética e percorrem a mesma distância. Deste modo, como o tempo de voo está relacionado com a velocidade e a velocidade vai variar consoante a massa ( $E_c = \text{constante}$ ), consegue-se determinar a massa dos iões que atravessam o tubo.

A zona de colisões está localizada entre dois pratos paralelos com 1,2cm de afastamento. Os iões resultantes da colisão dos dois feixes são extraídos através de um campo eléctrico na direcção normal ao plano de cruzamento. Estes iões são acelerados em direcção ao tubo de tempo de voo atravessando o sistema de lentes *Einzel* e posteriormente são detectados através de um detector de partículas carregadas do tipo canaltrão.

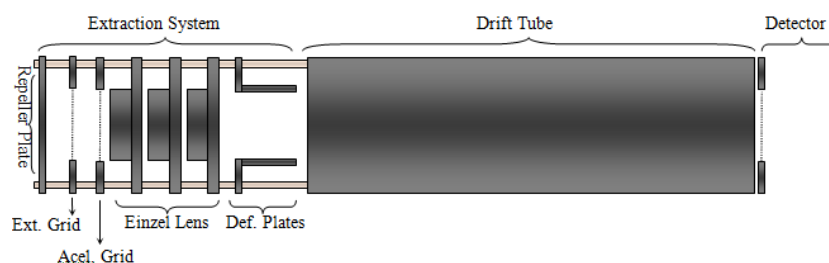


Figura 3.5. Espectrómetro de massa do tipo tempo de voo [13].



### 3.4.1. Sistema de extracção

No prato e na primeira rede, são aplicados um potencial de  $-3500\text{V}$ . No prato é aplicada uma tensão de  $-400\text{V}$  (sinal pulsado), que somado toma o valor total de  $-3900\text{V}$ . Os aniões formados são assim extraídos na região entre o prato e a primeira rede, e depois acelerados no espaço limitado por ambas as redes, adquirindo uma energia total até à entrada do detector canaltrão de  $3,9\text{keV}$ .

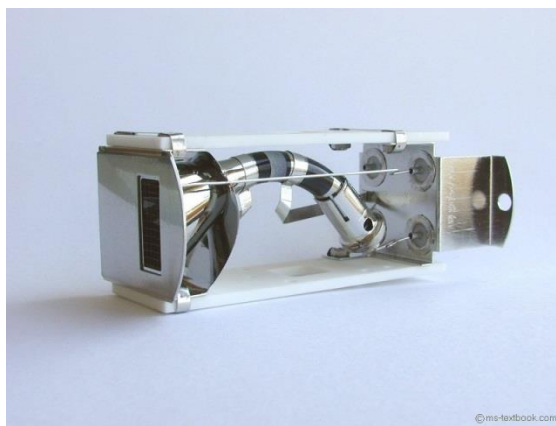
#### *Lentes Einzel*

Este sistema de lentes funciona como uma lente óptica que faz convergir as partículas carregadas, permitindo focar o feixe de partículas carregadas gerado na colisão, e otimizar o número de partículas detectadas. É aplicada uma tensão de  $-1500\text{V}$  no eléctrodo central, enquanto os outros dois estão a um potencial igual a zero.

### 3.4.2. Detector do tipo canaltrão

Os fragmentos iónicos formados na colisão entre os átomos de potássio e a molécula alvo ao serem extraídos da zona de colisão e conduzidos ao tubo de tempo de voo, são posteriormente detectados no detector canaltrão. Este detector é um dispositivo multiplicador de electrões, ou seja, produz a emissão de electrões secundários aquando da colisão de partículas na entrada deste detector. Uma vez que se estabelece uma diferença de tensão entre a entrada do detector e o seu colector (final), estes electrões são acelerados e ao colidirem com as paredes internas produzem electrões secundários num sistema de multiplicação em cascata. A diferença de potencial aplicada entre as extremidades do detector é tipicamente de  $2000\text{V}$ . Quando é detectada a chegada de um ião é produzido um impulso negativo de amplitude típica de  $-20\text{mV}$  e duração aproximada de  $8\text{ns}$ . O impulso obtido é isolado, amplificado e discriminado.

O detector usado apresenta uma forma tubular espiralada, com entrada cónica de  $1\text{cm}$  de diâmetro.



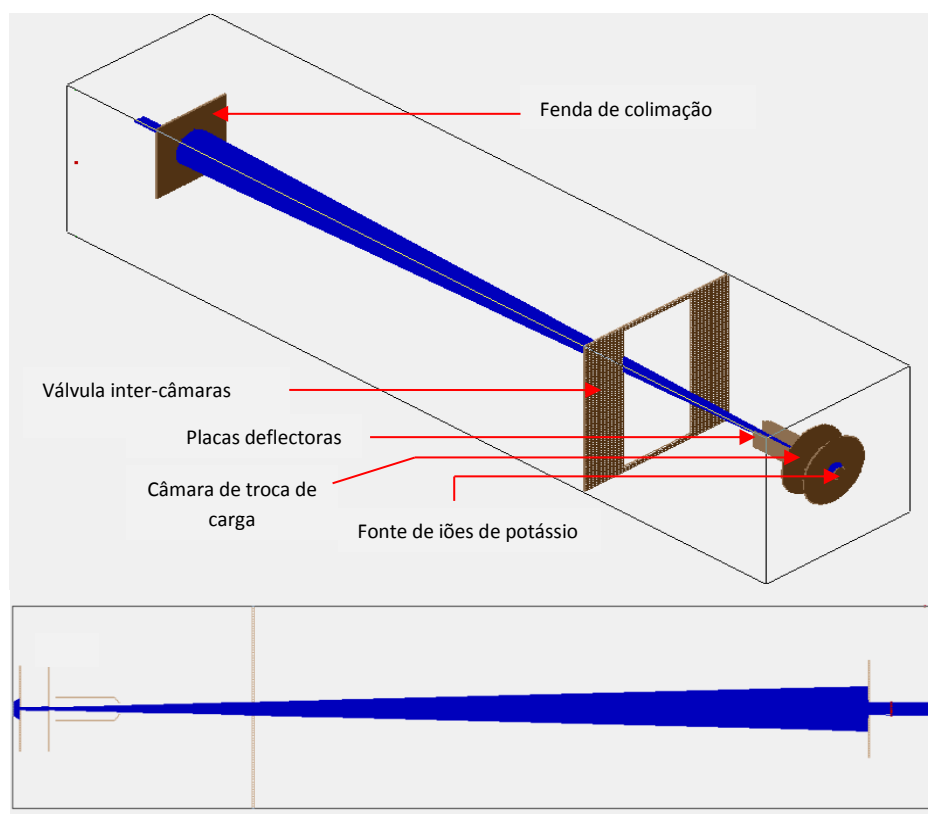
**Figura 3.6.** imagem ilustrativa de um multiplicador de electrões do tipo canaltrão.



## 4. Optimização do feixe de Potássio

### 4.1. Simulação da trajectória do feixe de potássio no aparelho de feixes cruzados

Com o objectivo de simular a trajectória do feixe de potássio, foram executadas várias simulações em ambiente SIMION. Para tal, foram desenhados todos os componentes envolvidos na trajectória do feixe e aplicada uma tensão de aceleração entre a fonte de iões e a câmara de troca de carga. O comportamento do feixe do aparelho de feixes cruzados está esquematicamente representado na figura 4.1.

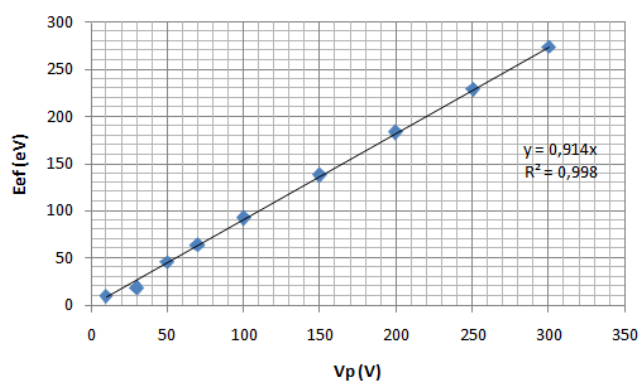


**Figura 4.1.** Trajectória do feixe de potássio simulado em ambiente SIMION. A válvula inter-câmaras como não tem efeito colimador, foi desenhada numa escala maior para uma melhor visualização. O comprimento total nesta simulação corresponde a 0,60m.

Na configuração configuração actual, a energia efectiva do feixe apresenta um valor ligeiramente menor que o pretendido e apresenta uma dependência linear com a tensão aplicada, de acordo com a tabela 4.1 e figura 4.2.

**Tabela 4.1.** Energia efectiva do feixe de átomos potássio em função da tensão de aceleração, obtidos em em SIMION.

$V_{\text{aceleração}} \text{ (V)}$	$E_{\text{ef}} \text{ (eV)}$
10	9,2
30	18,3
50	45,8
70	64,1
100	91,6
150	137,4
200	183,1
250	228,9
300	274,7



**Figura 4.2.** Dependência da energia efectiva com a tensão de aceleração.

Dos resultados obtidos observa-se que a energia efectiva do feixe corresponde a aproximadamente 91% da tensão de aceleração. O seu comportamento é linear de acordo com o ajuste efectuado na fig. 4.2 e um coeficiente de correlação de 0,998, tal que:

$$E_{\text{ef}} = 0,914V_p \quad (4.1.)$$

Os resultados obtidos acima não têm em conta perdas de energia devido a transferências de momento linear no interior da câmara de troca de carga entre os átomos de potássio[16].

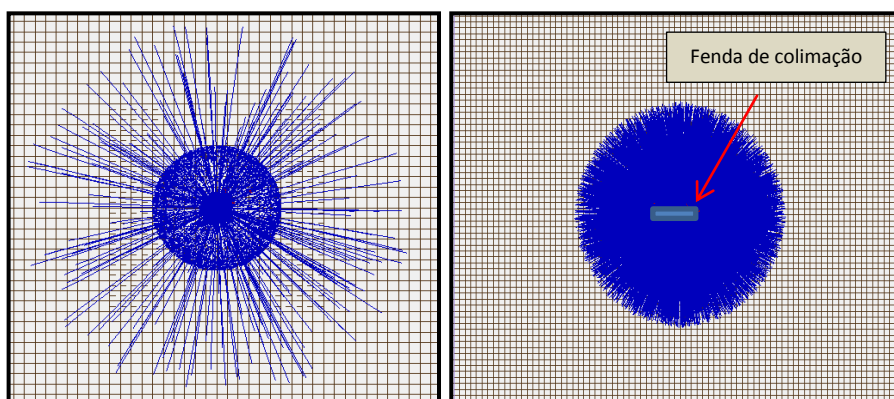
Além de estudos efectuados sobre a energia efectiva do feixe, também se obtiveram dados sobre a transmissão e densidade do feixe, permitindo retirar conclusões sobre o aproveitamento dos iões emitidos pela fonte de  $K^+$ , que juntamente com as correntes obtidas no detector LT permitiu também fazer uma estimativa sobre a taxa de troca de carga no interior da câmara.

Na configuração actual os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.2. Para estes valores simulados obtiveram-se coeficientes de transmissão muito baixos, indicador de um baixo aproveitamento da densidade de iões de potássio emitidos pela fonte de iões ou pastilha. Face a amostra usada para efectuar este estudo, não se observa uma relação muito evidente entre a taxa de transmissão e a tensão aplicada. Contudo, é possível observar a redução de duas ordens de grandeza entre as partículas que se encontram antes e depois da fenda de colimação (fdc), observação essa corroborada pelos valores das correntes medidas no tira-íões (TI) e no detector de Langmuir-Taylor (LT).

**Tabela 4.2.** Coeficientes de transmissão para o feixe de potássio, obtidos por simulação em SIMION, para uma amostra de  $1 \times 10^5$  íões de potássio à saída da fonte iónica.

Tensão de polarização (V)	Partículas após ctc	Partículas após fdc	Coef. de transmissão (%)
10	411	4	0,004
20	428	4	0,004
50	430	6	0,006
70	430	4	0,004
100	433	9	0,009
150	462	5	0,005
200	444	4	0,004
250	400	8	0,008
300	403	4	0,004

Observa-se nas figuras 4.1 e 4.3 uma grande dispersão angular, o que conduz a um feixe com uma área transversal elevada no final da sua trajectória, e inevitavelmente, a um coeficiente de transmissão bastante baixo. Contudo, a maior perda de íões dá-se na zona de extracção, antes da CTC. A fonte de íões de potássio tem um diâmetro 5 vezes maior que a abertura da câmara pelo que é necessário um sistema de focalização do feixe antes dos íões entrarem na CTC.



**Figura 4.3.** Imagem do feixe de potássio de  $5 \times 10^4$  íões em que é possível verificar o grau de dispersão espacial (à esquerda). À direita, uma mesma imagem de um feixe de potássio, mas com  $2 \times 10^6$  de íões. A imagem foi tirada na zona da fenda de colimação. A fenda de colimação encontra-se no centro geométrico de ambas as imagens e consiste numa fenda rectangular com dimensões 5mmx1mm.

Observa-se na figura 4.3 à esquerda, não só os íões que embatem na chapa da fenda de colimação, como também os íões emitidos na zona de extracção que se traduz num círculo bem definido. Na imagem da direita da figura 4.3, percebem-se melhor os contornos do feixe ao chegar à fenda de colimação.

Através dos valores de transmissão que se obtiveram pode-se normalizar esses mesmos valores em termos de corrente calculando a corrente inicial. Relacionando os valores de transmissão com as correntes medidas, para uma dada tensão, pode-se calcular a corrente à saída da fonte ou pastilha de potássio.

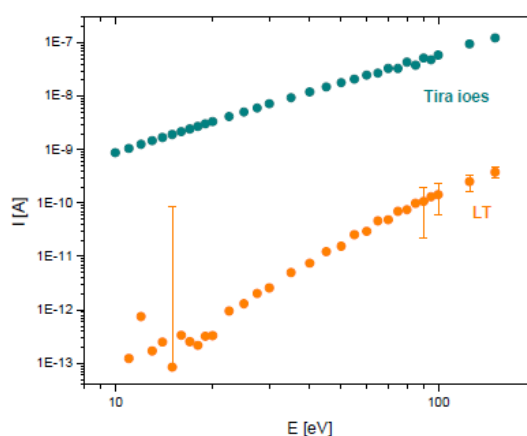
Para uma tensão de 100V tem-se uma corrente correspondente a aproximadamente 200pA no detector LT. Através destes valores é possível calcular a quantidade de íões que passa no detector. Sabendo que o coeficiente de transmissão é igual a 0,004%, determinou-se o número de íões esperado, assim como a corrente na fonte de íões potássio. Segundo as especificações, as densidades de corrente variam entre 1 e 10mA/cm<sup>2</sup> para temperaturas entre 900°C e 1100°C [17]. No entanto não se pode ignorar o efeito de carga espacial e o estado de carga da pastilha em questão visto que a sua taxa de emissão decrescer com tempo de vida ou de funcionamento desta. Assim:

$$j = nqv = I/A \quad , \quad v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \quad (4.2.)$$

A massa m, corresponde à massa do potássio e a área A, é a área da face da pastilha. A pastilha com 5mm de diâmetro possui uma área de 0,196cm<sup>2</sup>. Tem-se então uma densidade de corrente de 0,11mA/cm<sup>2</sup>.

**Tabela 4.3.** Cálculo da densidade de corrente na fonte de íões com o forno de potássio sólido ligado.

V (V)	E <sub>c</sub> (J)	V (m/s)	I LT (A)	I TI (A)	n LT (m <sup>-2</sup> )	n TI(m <sup>-2</sup> )	n pastilha (m <sup>-2</sup> )	J (mA/cm <sup>2</sup> )
100	1,60E-17	4,91E+08	2,20E-10	-	1,24E+10	-	3,10E+14	1,10E-01
			-	5,00E-08	-	1,99E+13	4,97E+15	8,91E-02



**Figura 4.4.** Comparação da corrente de íões K<sup>+</sup> no “tira-íões” e no Langmuir-Taylor [18]. As barras de erro encontram-se apenas representadas em alguns pontos para evitar que a figura fique muito congestionada.

No gráfico acima, o detector LT apenas mede uma corrente parcial, servindo apenas de monitorização.

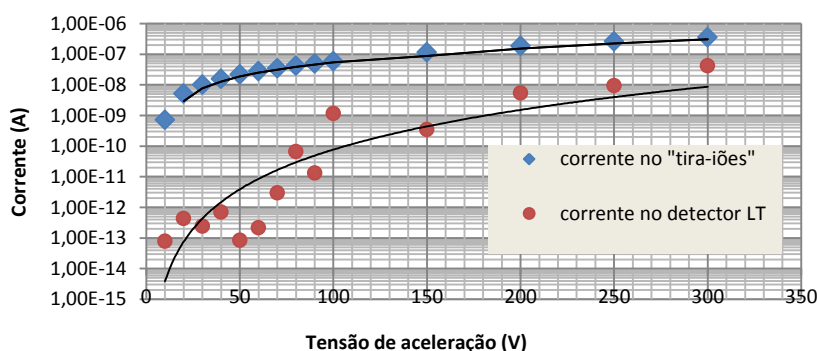
Para aferir a corrente que a fonte de potássio debita, mediu-se a corrente no TI e no detector de LT com o forno desligado, eliminando deste modo a transferência de carga entre catião potássio hipertérmico e potássio neutro térmico. Dessa forma, não ocorrem trocas de carga no interior da câmara. É possível deste modo calcular a corrente que é debitada pela fonte de potássio. Obteve-se uma densidade de corrente igual a 0,59mA/cm<sup>2</sup> (ver tabela A.1), valor concordante com a lei de Chil-Langmuir.

De acordo com a lei de Child-Langmuir a densidade de corrente da pastilha de íões de potássio encontra-se limitada devido à nuvem de íões criada junto à fonte, o que para uma

tensão de aceleração de 100V e para uma distância entre o ânodo e a CTC de 2,5mm, corresponde a uma densidade de  $0,61\text{mA}/\text{cm}^2$ . É possível observar este efeito, causado pela carga espacial, através do comportamento que a corrente toma em função da tensão de polarização como se verifica na figura 4.5.

Comparando as correntes obtidas no detector LT, com o forno ligado e desligado, é possível ainda extrapolar um valor aproximado da taxa de troca de carga visto que com o forno ligado, o detector LT apenas monitoriza átomos neutros (mantendo o tira-iões ligado), e com o forno desligado apenas monitoriza um feixe puramente iónico. Calculando a razão entre as correntes obtidas no detector LT, com o forno em ambos os estados, verifica-se que apenas 18,6% dos iões que entram na CTC trocam, efectivamente, de carga.

A figura 4.5 mostra o valor das correntes obtidas no TI e no detector LT.



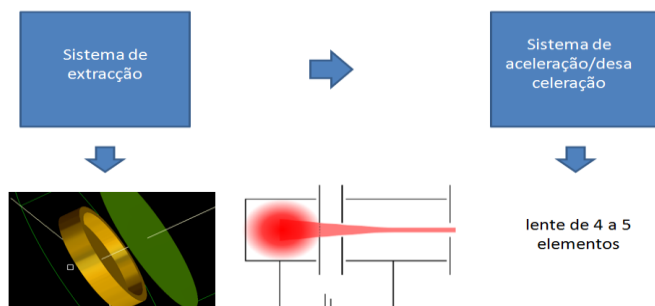
**Figura 4.5.** Intensidade de corrente de potássio no tira-iões e no detector Langmuir-Taylor, medidas com o forno de potássio sólido desligado.

## 4.2. Optimização da intensidade do feixe de iões $\text{K}^+$

Neste sub-capítulo são sugeridas tópicos de melhoria no aproveitamento dos iões  $\text{K}^+$  produzidos, que ao serem implementadas conduzirão a um aumento significativo da densidade do feixe que chega à zona de colisão e, conseqüentemente, um menor tempo de acumulação na obtenção dos espectros para os diferentes alvos moleculares em estudo. O processo de optimização do feixe de potássio divide-se em duas partes:

- Alteração da geometria da placa de polarização;
- Dimensionamento de um sistema de lentes electrostáticas convergente.

O primeiro passo na produção de um feixe de partículas carregadas de baixa energia é a sua extracção da fonte e a sua formação num feixe. A fonte e o espaço de aceleração constituem o sistema de extracção, ou injector. O injector representa apenas uma fracção do custo de montagem de um sistema deste género mas pode ser um aspecto crítico no desempenho do aparelho. As partículas movem-se devagar no primeiro espaço de aceleração, onde as forças de Coulomb têm uma maior influência na alteração das suas trajectórias.

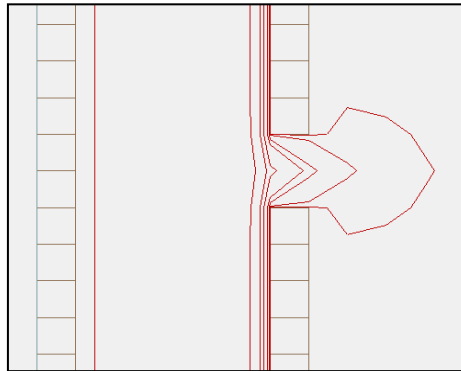


**Figura 4.6.** Esquema de blocos das melhorias propostas.

No primeiro espaço de aceleração é onde as PC ganham energia cinética enquanto no segundo espaço de aceleração, o que se pretende é corrigir principalmente a trajectória das partículas localizadas nas camadas exteriores do feixe e convergi-lo na fenda da CTC recorrendo a um sistema de lentes, como se mostra na figura 4.6.

#### 4.2.1. Sistema de extracção

Na configuração actual, para além da discrepância entre os diâmetros da pastilha e da abertura da câmara de troca de carga, pode-se constatar uma distorção das linhas equipotenciais perto da abertura ou fenda de entrada da CTC (fig.4.7). Este facto faz divergir o feixe diminuindo assim a densidade de corrente (as partículas afastam-se do eixo óptico, semelhante a uma lente divergente). Este fenómeno está muitas vezes associado às lentes *Calbert* que fazem uso desta propriedade [7].



**Figura 4.7.** Ilustração do efeito divergente do campo eléctrico na abertura da CTC, obtida em SIMION..

Na configuração actual, o ânodo encontra-se a uma distância de 2,5 mm da fenda da câmara de troca de carga, cujo diâmetro é de 1mm. A influência da abertura no campo eléctrico de aceleração é menor quanto maior a distância entre o ânodo e a abertura, em comparação com o diâmetro da mesma (eq.4.3.). O campo eléctrico varia inversamente com a distância e portanto o aumento da distância traduz-se, visualmente, num maior espaçamento das linhas equipotenciais.

$$E = k Q/d^2 \quad (4.3)$$

$$2R_{abertura} \ll d \quad (4.4)$$

Em que k é a constante electrostática, Q a carga geradora do campo electrostático, R o raio e d a distância entre os eléctrodos. Tendo em consideração que a pastilha de potássio possui um diâmetro de 5 mm e assumindo que a sua face possui uma geometria planar, (eq.4.3.), é possível estimar a corrente produzida com esta configuração através da lei de Child-Langmuir limitada pela carga espacial. Para a lei de Child-Langmuir assume-se que:

- Os eléctrodos são planares e paralelos entre si;
- Os iões têm velocidade nula junto à superfície do ânodo;
- Na zona de extracção apenas se encontram iões  $K^+$ ;
- A corrente é limitada pela nuvem de iões que se encontra junto ao ânodo (carga espacial);

$$I = JS = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2Ze}{m}} \frac{V^{3/2}}{d^2} S = 5,44 \times 10^{-8} \sqrt{Z/A} \frac{V^{3/2}}{d^2} S \quad (4.5)$$



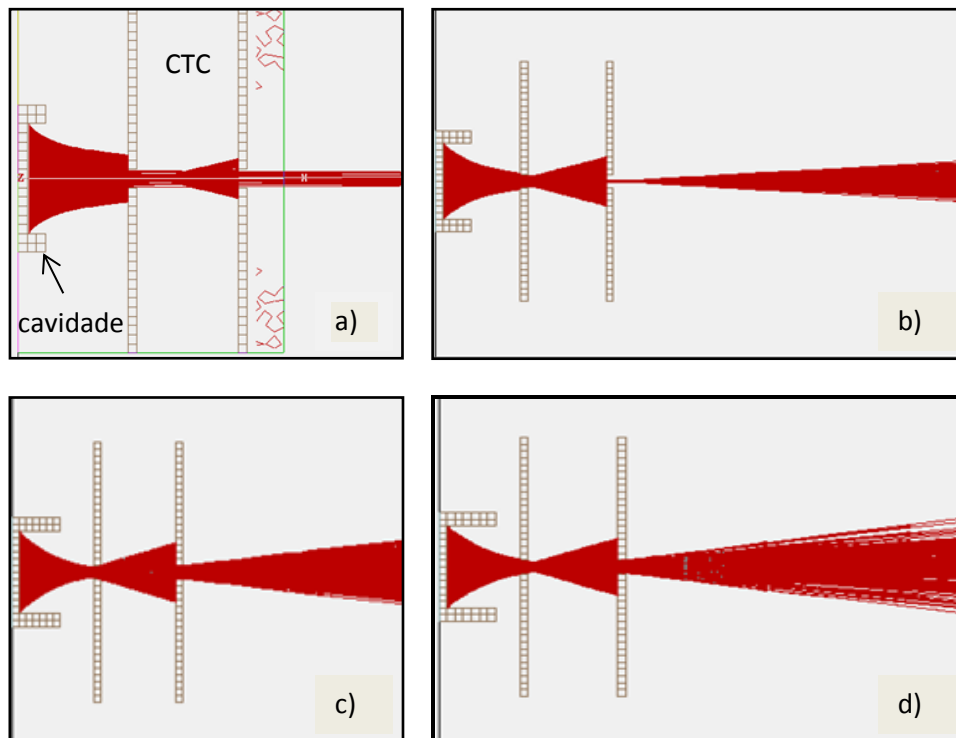
Em que  $\epsilon_0$  é a permeabilidade eléctrica,  $m$  a massa do potássio,  $e$  a carga do electrão e  $S$  a área superficial da fonte de iões. Dividindo ambos os membros da equação por  $V^{3/2}$  obtém-se:

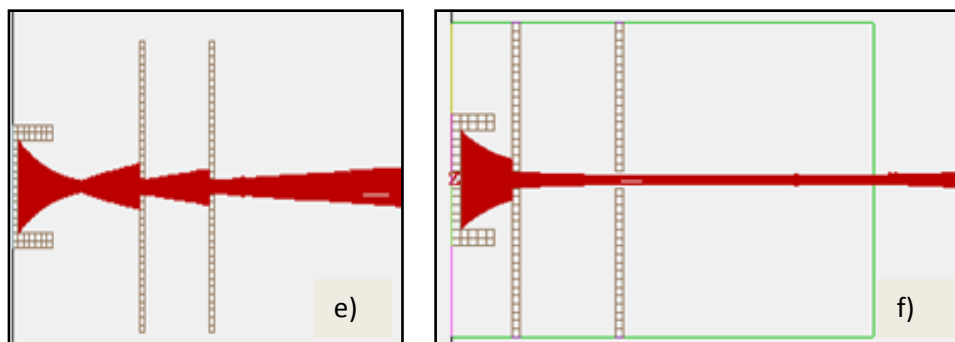
$$P = I/V^{3/2} \quad (4.6)$$

Pela equação acima pode-se observar que a corrente depende apenas da geometria do extractor e do tipo de partícula (para uma tensão que é mantida constante). A esta grandeza é dado o nome de *perveance* e é usada para caracterizar sistemas de extracção cilíndricos com uma abertura [6].

A geometria planar é adequada para sistemas de extracção com valores abaixo de  $1\mu\text{perv}$  [6]. Até esse valor o efeito divergente que o feixe sofre na abertura, por exemplo, é desprezável. Para valores superiores é necessário aplicar uma geometria diferente que permita convergir o feixe na respectiva abertura. Uma das sugestões passa então por alterar a geometria da placa de polarização e substituir a geometria planar (actual), por uma cavidade cilíndrica onde a pastilha é inserida, figura 4.5. Isso força a convergência do feixe na zona de extracção.

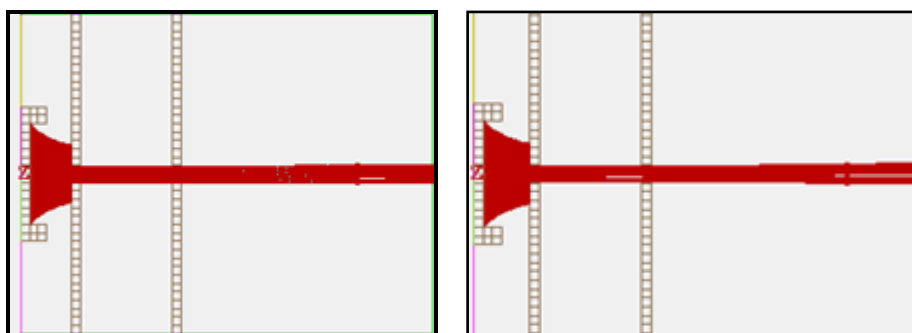
Abaixo são apresentadas várias imagens de feixes de potássio, em que se testaram várias distâncias e diferentes alturas das paredes da cavidade.





**Figura 4.8.** Análise do comportamento do feixe face a cavidades com diferentes profundidades, e face a zonas de extracção mais extensas. a) cavidade com 1mm de altura e zona de extracção com 5mm; b) cavidade com 2mm de altura e zona de extracção com 5mm; c) cavidade com 3mm de altura e zona de extracção com 5mm; d) cavidade com 3mm de altura e zona de extracção com 4mm; e) cavidade com 2mm de altura e zona de extracção com 10mm; f) cavidade com 2mm de altura e zona de extracção com 3mm de comprimento.

Foram testadas apenas cavidades cujas paredes tinham até 3mm de altura pelo facto de que com esta altura já se conseguir um grande poder de focalização. Numa primeira fase, a extensão da zona de extracção, foi limitada à distância de 10mm. Essa distância corresponde à distância máxima que neste momento é possível afastar a pastilha de potássio da CTC. Com estas observações conseguem-se obter dados que possam, a curto prazo e sem grandes alterações a nível estrutural, aumentar a densidade de corrente na zona de colisões.

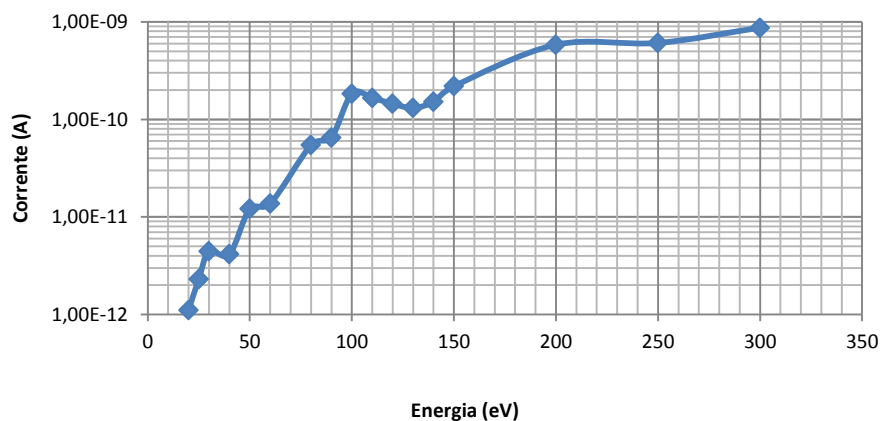


**Figura 4.9.** Comparação da trajectória do feixe de potássio aplicando uma tensão de aceleração de 100V (esquerda), e uma tensão de 20V (direita).

As simulações acima permitiram uma análise qualitativa inicial de como o feixe se comporta com esses dois parâmetros. Pôde-se constatar, por análise das figuras acima, que as configurações a) e f) são as que permitem a formação de um feixe bem definido, i.e. mais bem colimado. Desta forma, em vez de passar apenas 1 ião por cada 10 000 pela fenda de colimação, consegue-se um valor para a transmissão aproximadamente de 6%.

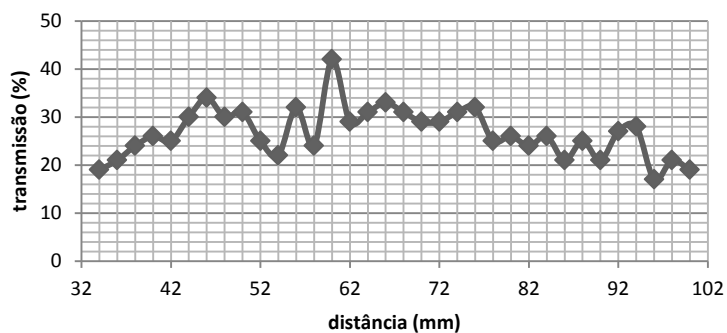
Na figura 4.9 observa-se que a intensidade é mais reduzida com uma tensão de 20V do que com uma tensão de 100V. Porém, o feixe comporta-se de igual modo e possui a mesma forma. Não há alterações significativas na forma e trajectória do feixe.

No seguimento destas simulações, foi testada esta nova geometria através da inserção de uma folha de molibdéio envolvendo a pastilha de potássio formando deste modo uma cavidade. A escolha do molibdéio deve-se sobretudo à sua elevada resistência e ao seu elevado ponto de fusão (2896K). Colocou-se o molibdéio (que está polarizado), a envolver a cabeça da pastilha de potássio, mantendo a distância habitual de 2,5mm. Observou-se, de facto, um aumento da intensidade de corrente no detector LT.

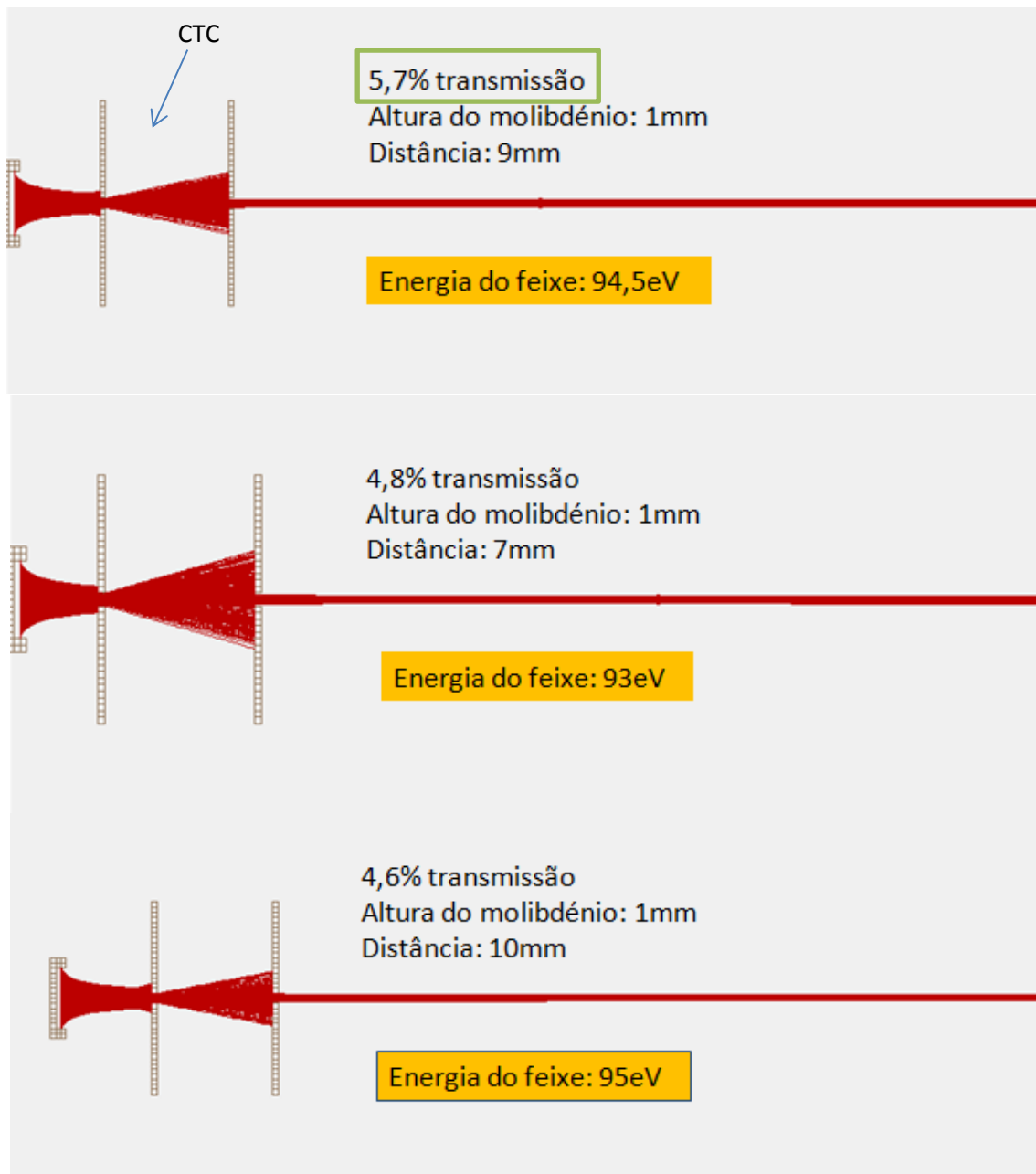


**Figura 4.10.** Intensidades de corrente medidas no detector Langmuir-Taylor para tensões de aceleração entre 20V e 300V.

Na figura 4.11 apresenta-se a transmissão em função da distância entre a placa polarizadora e a CTC. Para distâncias superiores a 10mm, nomeadamente a uma distância de 60 mm, observa-se uma transmissão após a CTC, superior a 40%. Para distâncias entre 40 e 50mm e cerca de 60 e 75mm observa-se uma transmissão superior a 30%.



**Figura 4.11.** Transmissão de iões de  $\text{K}^+$  à saída da CTC para diferentes valores da zona de extracção. Simulações efectuadas em SIMIION com uma amostra de apenas  $1 \times 10^3$  partículas.



**Figura 4.12.** Comparação das transmissões após a CTC, para diferentes distâncias entre a fonte de iões e a CTC.

Em comparação com os 0,4% de transmissão qualquer uma das configurações é adequada. Porém o ponto óptimo é encontrado para uma distância igual a 9mm, onde o feixe possui um diâmetro menor, i.e., onde se encontra a posição central do disco de confusão mínima.

#### 4.2.2. Sistema de convergência

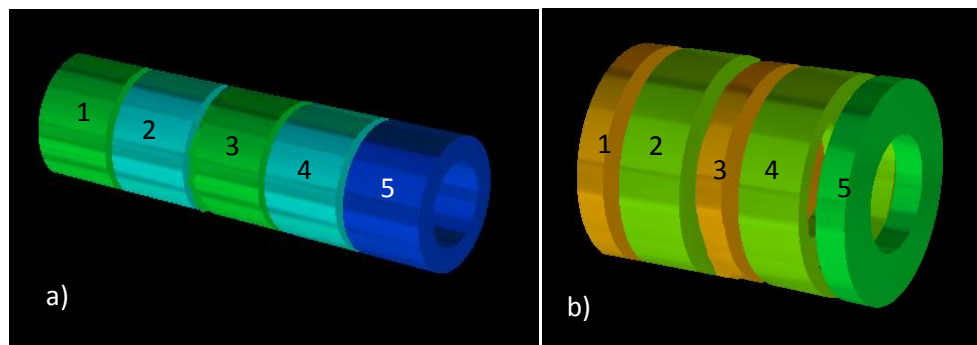
Dos vários sistemas estudados, são mostrados dois que montados imediatamente antes da CTC, poderão permitir uma maior densidade corrente através da abertura da CTC. Estes dois sistemas apenas diferem na sua geometria e no espaço que ocupam, pois possuem o mesmo número de elementos pelo que o seu modo de funcionamento é idêntico.

Regra geral, a utilização de um sistema lentes de convergência tem as seguintes características:

- I. Ao convergir o feixe é possível compensar o efeito de divergência obtido no orifício e obter um feixe coerente à saída. (aspecto observado nas imagens da figura 4.12);
- II. Permite atingir densidades de corrente mais elevadas se a fonte debitar uma corrente constante e se a sua área for superior comparativamente à área transversal da abertura onde se pretende fazer convergir o feixe.

Se a influência da densidade de carga espacial for moderada, é expectável que as previsões sobre os efeitos dos campos eléctricos formados se aproximem bastante dos resultados obtidos experimentalmente.

É desejável, ao desenhar um sistema de lentes, a obtenção do melhor controlo focal e com o mínimo de aberrações possíveis. Com o recurso ao SIMION foi possível simular diversas configurações e estudar diferentes modos de operação dos respectivos sistemas. Os sistemas com os melhores resultados são aqui apresentados. Foram efectuados diversos estudos para diferentes energias de feixe e diferentes distâncias entre o sistema extracção e o sistema de convergência de modo a determinar a distância óptima do espaço de aceleração. Ambos os sistemas foram desenhados em ambiente SIMION, e são compostos por 5 eléctrodos cilíndricos. Os eléctrodos 2 e 4 são os responsáveis pelas propriedades focais enquanto os eléctrodos 1, 3 e 5 encontram-se a um potencial nulo. O último eléctrodo pode ser utilizado, para determinar a energia do feixe de iões, variando a sua energia efectiva (os iões são acelerados ou desacelerados).

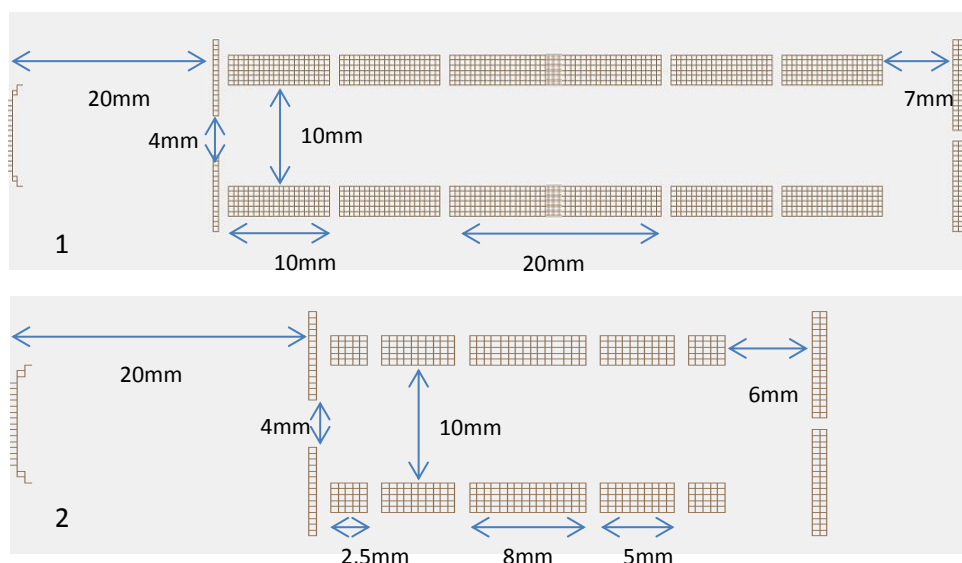


**Figura 4.13.** Esquemas de dois dos sistemas de lentes simulados. No sistema da direita o 2º e o 4º eléctrodo consistem numa cavidade cilíndrica com uma abertura circular no centro.

Os resultados obtidos evidenciam uma grande melhoria relativamente à configuração actual. É possível a obtenção de correntes superiores devido a um aumento substancial da taxa de transmissão. Ambas as lentes têm um diâmetro interno tal, que a teoria paraxial permanece válida atenuando-se assim as aberrações.

O motivo pelo qual se optou por um sistema de lentes composto por 5 eléctrodos, foi o grau de ampliação, que é maior que numa lente *Einzel* [19], e a forma gradual como se consegue esse poder focal, que atenua em muito a presença de aberrações. Outra vantagem é o controlo total sobre a energia efectiva do feixe. Em qualquer lente, se a partícula não exibir a mesma trajectória de saída e entrada, vai perder ou ganhar energia, contribuindo para a dispersão de energia. O 5º eléctrodo pode servir, ao ser-lhe aplicada uma tensão, para

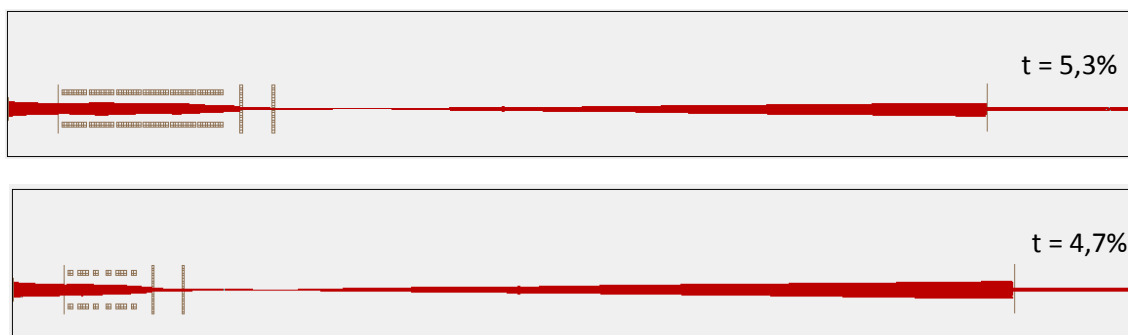
compensar essas variações de energia, obtendo-se à saída um feixe com a energia que realmente se pretende. As suas dimensões encontram-se indicadas na figura 4.14.



**Figura 4.14.** Dimensões e localização do sistema de convergência 1 e 2. O espaçamento entre electrodos é igual para ambos e toma o valor  $A = 0,1D = 1\text{mm}$ .

Nas várias configurações são conseguidas transmissões finais na ordem dos 5%. Os dois sistemas da figura 4.12 são os sistemas com os resultados mais promissores, com um desempenho semelhante mas apresentam características distintas que podem fazer a diferença na altura de optar pelo que se adequa ao pretendido, tendo em conta todas as condicionantes existentes. O comprimento do electrodo central do sistema 2 foi dimensionado de modo a maximizar a transmissão do feixe.

Na figura 4.15 observa-se o comportamento do feixe em ambos os sistemas.



**Figura 4.15.** Trajectória do feixe de potássio usando dois sistemas de convergência diferentes. O sistema de baixo possui ter 6 electrodos estando os dois electrodos centrais ao mesmo potencial. Pode-se assumir que ambos se encontram ligados e que se tem um único electrodo central, que quando ligado ao potencial da terra, apenas serve de espaçador entre as lentes, aumentando ou diminuindo as suas propriedades focais.

Em ambos os sistemas usou-se um sistema de extracção que consiste numa cavidade com paredes inclinadas (em vez de rectas, como discutido anteriormente). Isto força a que o feixe inicie o seu movimento com um grau de paralelismo bastante grande. Usou-se ainda uma abertura colimadora do feixe. Parte do feixe, inevitavelmente, não passará e não entrará na CTC. Ao colimar o feixe pretende-se reduzir o seu diâmetro, para garantir que este entre o mais paralelamente possível no interior do sistema de lentes (respeitando a equação 4.3). Assim, controla-se com facilidade o seu ângulo de entrada na CTC, deslocando apenas o seu foco ao ajustar a tensão nos electrodos, de modo a maximizar a sua transmissão e compensar

o efeito divergente que existe na sua abertura. A redução do feixe também permite que a teoria paraxial seja válida para dimensões mais reduzidas dos eléctrodos.

Essas paredes possuem cerca de 3mm de comprimento e fazem um ângulo de 42° com a base da cavidade que possui um diâmetro de 6mm, conforme se ilustra na figura 4.15.



**Figura 4.16.** Feixe formado com cavidade de extração usando a geometria de Pierce.

Pode-se observar que o sistema de lentes da figura 4.13a), possui uma menor dispersão angular e isso reflecte-se no aumento da sua transmissão. Fizeram-se variar as distâncias entre eléctrodos e as tensões aplicadas com o intuito de otimizar valores de densidade de corrente na zona de colisões. Para um feixe de 100eV, foi obtida uma transmissão máxima de 5,3% aplicando uma tensão de 48,5V (no segundo e quarto eléctrodos, estando os restantes ligados à massa). No outro sistema conseguiu-se fazer chegar à zona de colisões 4,7% dos iões emitidos pela fonte aplicando uma tensão de 80V. Como o comprimento dos eléctrodos é menor, é necessário aplicar uma tensão mais elevada para se conseguir o mesmo desempenho, ou seja, possui um menor poder focal.

$$V_{lente1} = 0,485 E_{feixe} \quad (4.7)$$

$$V_{lente2} = 0,80 E_{feixe} \quad (4.8)$$

Outra vantagem deste segundo sistema é o facto de conseguir praticamente o mesmo desempenho ocupando menos de metade do espaço. Isto é importante pois existem algumas restrições de espaço, como o diâmetro da câmara de vácuo.

Voltando ao tópico anterior, observou-se que usando uma cavidade cilíndrica para extrair os iões, se conseguia aproximadamente 6% de transmissão o que levanta a questão se realmente se justifica a implementação de um sistema de lentes. Analisando as simulações observa-se que usando apenas a cavidade cilíndrica se tem uma dispersão espacial muito grande no interior da CTC (não há controlo focal), o que não se observa em nenhum dos sistemas descritos anteriormente. Essa dispersão contribui para o aumento de colisões inelásticas e transferências de momento entre as partículas. Consequentemente, espera-se um feixe menos intenso e com uma menor energia (recorde-se que a energia máxima do feixe usando a cavidade cilíndrica polarizada a 100V, para uma distância de 9mm, é 94eV, devido à componente de aceleração centrípeta, responsável por fazer convergir o feixe, que não contribui para o aumento de energia cinética dos iões).

Em ambos os sistemas de lentes é possível atingir-se os 97eV, podendo alcançar-se os 100eV bastando apenas aplicar uma tensão de correcção no 5º eléctrodo, como já foi descrito anteriormente.

Considerando as transmissões obtidas por simulação e as reais obtidas com a configuração existente, pode-se deste modo estimar a melhoria obtida em termos de número de colisões.

$$\text{Razão das transmissões} \cong 5\% / 0,004\% = 1250 \quad (4.9)$$

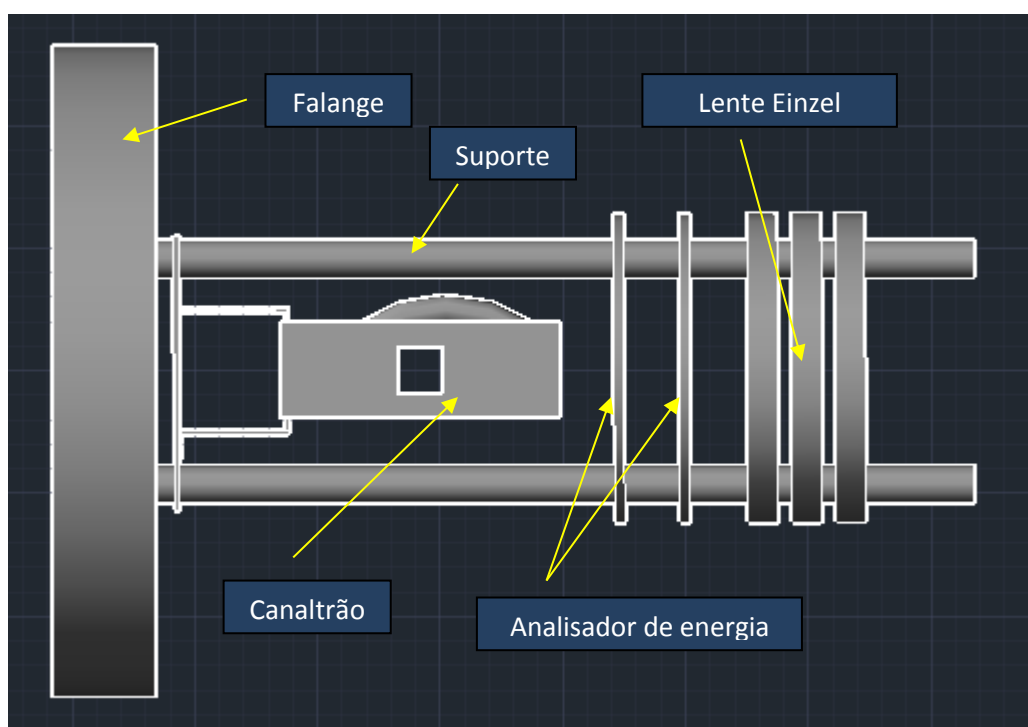
Com estas alterações, e relacionando as transmissões obtidas, espera-se conseguir em boa aproximação (e assumindo que cada ião que passa pela fenda de colimação participa numa

colisão), 1250 vezes mais colisões, o que reduzirá bastante o tempo de aquisição de espectros em comparação com a configuração actual do aparelho de feixes moleculares.



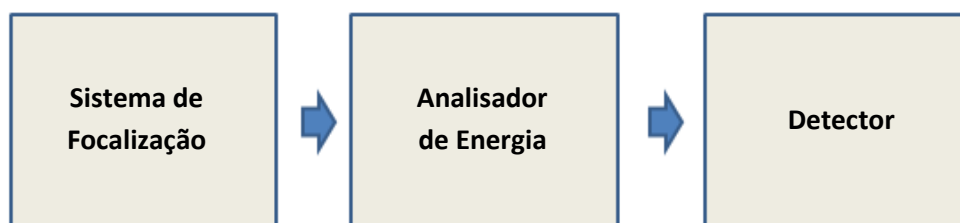
## 5. Analisador de dispersão de energia de um feixe de partículas carregadas

O sistema projectado pode dividir-se em três blocos fundamentais: O sistema de colimação, o analisador de energia e o detector do tipo canaltrão. Tudo isto será montado num suporte constituído por 4 varões de aço-inox enroscados a uma falange. O sistema será colocado na câmara de colisões, devidamente alinhado com o feixe de potássio iónico no final da sua trajectória. Pretende-se com este sistema determinar a energia efectiva do feixe de potássio e a respectiva dispersão medindo a intensidade para diferentes energias.



**Figura 5.1.** Esquema do sistema de análise de dispersão em energia desenhado em ambiente AUTOCAD.

No sistema de focalização, o feixe é focado no infinito de modo a que ele entre paralelamente ao campo eléctrico aplicado no interior do filtro de partículas carregadas. Isto fará com que apenas a velocidade das partículas seja influenciada e não a sua direcção. É importante que a aceleração centrípeta seja nula em prol de uma maior precisão.



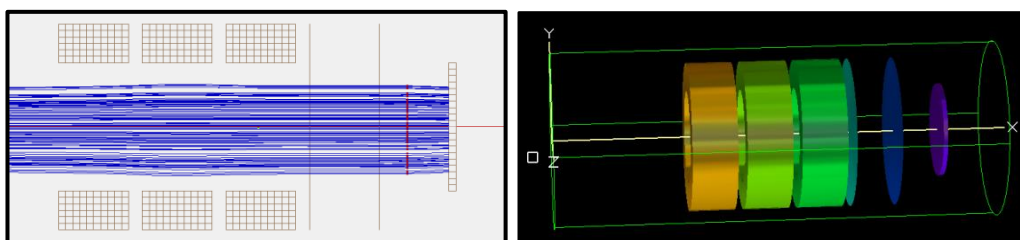
**Figura 5.2.** Esquema simplificado do sistema de análise de energia de partículas carregadas.

O detector dá-nos a informação sobre a quantidade de partículas carregadas que possuem uma energia superior à tensão aplicada no analisador, funcionando como um filtro de iões.

## 5.1. Descrição do analisador

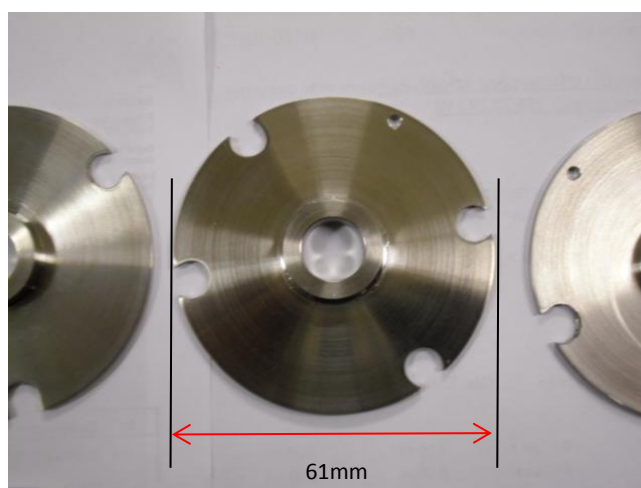
### 5.1.1. Sistema de focalização – lente *Einzel*

Para obter um feixe iónico estritamente paralelo desenvolveu-se um conjunto de eléctrodos - Lente *Einzel* - que têm um comportamento similar a uma lente óptica, permitindo convergir, ou focar, o feixe de partículas carregadas. Pretende-se assim otimizar tanto a precisão do aparelho como a quantidade de iões que alcançam o detector. Se os iões incidirem com um determinado ângulo, mesmo que possuam uma energia maior que a tensão de retardamento, eles serão deflectidos.



**Figura 5.3.** À esquerda, um esquema do analisador de energia a focalizar o feixe de  $K^+$  e a embater no canaltrão. À direita um esquema tridimensional obtido em ambiente SIMION.

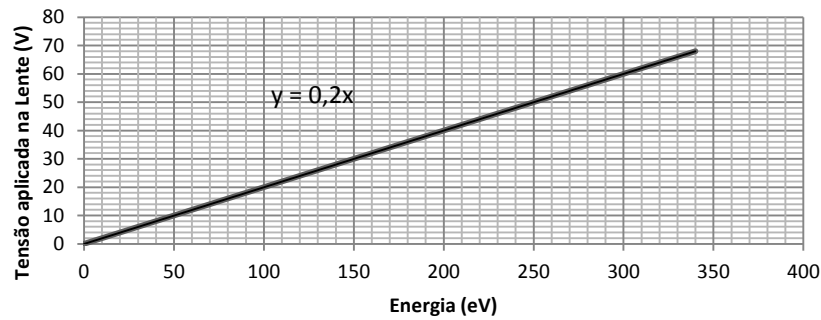
A lente Einzel é composta por 3 eléctrodos cilíndricos de aço-inox 316L, com um diâmetro interno de 12mm e um comprimento de 6mm, cada. Para se chegar a este dimensionamento, estudou-se o comportamento e a forma do feixe no final da sua trajectória, nomeadamente a sua extensão angular, de modo a decidir o comprimento e o diâmetro adequados. Cada cilindro está embutido num disco de aço-inox que possui um diâmetro de 61mm e estando os varões de suporte colocados nas extremidades (fig.5.4.).



**Figura 5.4.** Eléctrodos.

### ***Determinação da recta de calibração***

A figura 5.5 descreve a tensão aplicada no eléctrodo central da lente Einzel em função da energia cinética do feixe de iões de potássio. Por linearização, pode obter-se a recta de calibração para a tensão aplicada no eléctrodo central, em função da energia cinética do feixe de potássio.



**Figura 5.5.** Recta de calibração (para um espaçamento de 2mm entre os eléctrodos), simulado em SIMION.

A recta de calibração foi obtida para uma distância igual a 2mm entre os eléctrodos. Se essa distância variar ter-se-á uma outra recta de calibração.

### 5.1.2. Analisador de energia – Sistema de redes

Para a construção do analisador de energia optou-se pela aplicação de um campo electrostático entre duas placas condutoras, cada uma com uma abertura circular, na qual foi colocada uma rede de aço-inox bastante fina, com uma transmissão elevada. Uma partícula carregada ao entrar neste espaço é sujeita a uma força constante no sentido oposto ao do seu movimento. Trata-se de uma concepção semelhante a um filtro de Wien [7], com a diferença de que não é aplicado qualquer campo magnético, dado que se trabalha com feixes de baixa energia.



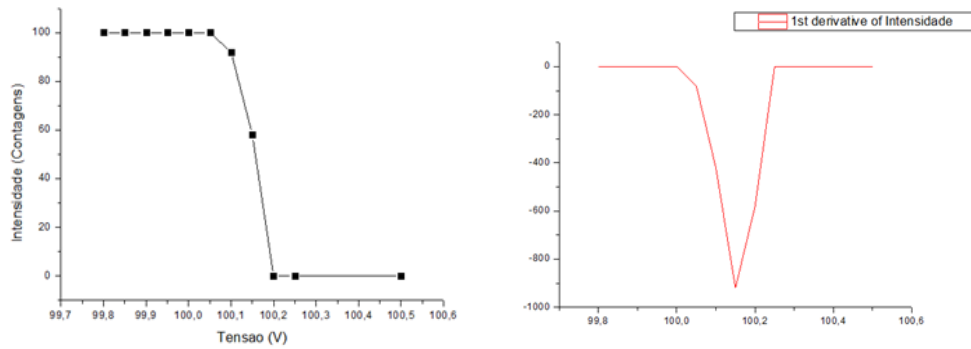
**Figura 5.6.** Discos de aço de 61mm que constituem o filtro de energia. Pode-se observar na imagem a anilha no interior do disco que foi usada para esticar a rede de aço-inox na abertura.

O uso de duas redes garante a aplicação de um campo eléctrico uniforme entre elas, isolando qualquer influência exterior, dada a proximidade com a lente Einzel. A rede foi colocada e esticada por uma anilha de aço-inox concentrica que foi inserida, conforme se mostra na imagem da figura 5.6.

### 5.1.3. Detector do tipo canaltrão

O detector utilizado é do tipo canaltrão. Trata-se de um detector multiplicador de electrões: em face da diferença de potencial aplicada entre a entrada e saída deste detector, os iões ao colidirem com a abertura de entrada do canaltrão, produzem a emissão de electrões, que ao colidirem com as suas paredes, emitem electrões secundários produzindo um efeito em cascata. No final obtém-se um sinal que nos dá a intensidade de iões com uma determinada energia.

A entrada do canaltrão é ligada à massa (potencial 0V) enquanto que na sua extremidade final é aplicada uma tensão de 2kV. A figura 5.7 representa a simulação em SIMION do sinal no detector canaltrão. Da derivada deste sinal, a largura a meia altura dá informação do valor da dispersão de energia do feixe de iões de  $K^+$ , que é igual à do feixe neutro (visto se tratar de uma troca de carga ressonante).

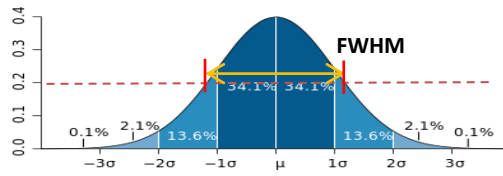


**Figura 5.7.** À esquerda, o perfil de energia do feixe de potássio, elaborado com os dados obtidos em SIMION. À direita, o sinal que se obtém depois de derivar o gráfico da esquerda.

## 5.2. Resolução em energia

Para determinar a dispersão em energia do feixe iónico de potássio é importante conhecer a resolução do sistema projectado. Como o feixe não vai exhibir a mesma trajectória à entrada e saída da lente, este vai ganhar ou perder energia. Para a determinação da resolução recorreu-se mais uma vez ao programa SIMION. Definiu-se um feixe com exactamente 100eV, e mediu-se a quantidade de iões que chegam ao detector canaltrão para diferentes tensões de retardamento. No caso ideal obter-se-ia um sinal em degrau (o que indicaria que o detector não interfere com a energia do feixe), cuja derivada seria a função de Dirac. Na realidade obtém-se um sinal semelhante ao da figura 5.7, e por derivação obtém-se um pico com uma largura a meia altura (FWHM, “Full Width at Half Maximum”), diferente de zero. A função gaussiana é representada analiticamente pela equação 5.1, em que  $\sigma$  e  $\mu$ , são o desvio-padrão e o valor médio, respectivamente.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1.)$$



**Figura 5.8.** Representação esquemática de uma distribuição normal ou Gaussiana [1].

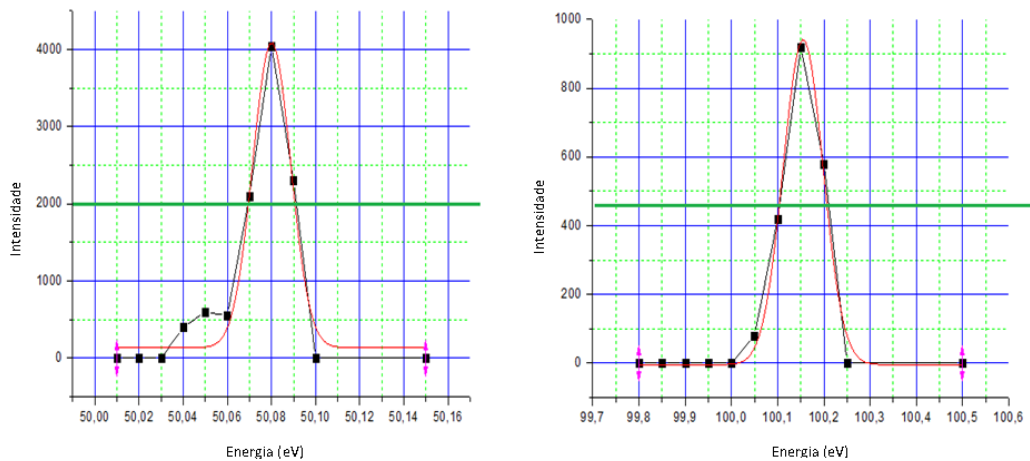
Numa distribuição normal, toda a região no intervalo  $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$  representa cerca de 68% do conjunto, enquanto a região do intervalo  $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$  representa cerca de 95%, e no intervalo  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$  a região definida corresponde a 99.7% da área total- *regra dos 3-sigmas*. Pode-se observar na figura 5.8 que a FWHM fornece um nível de confiança acima de 95%.

$$FWHM = 2\sqrt{\ln(2)}\sigma \approx 2,355\sigma \quad (5.2.)$$

A largura a meia altura fornece-nos, segundo a figura 5.9, o desvio de energia que o feixe sofre ao passar pela lente. A resolução é calculada através da equação (5.3):

$$R = \frac{E}{\Delta E} \quad (5.3.)$$

Na figura 5.9 apresentam-se as simulações para valores de 50V, e 100V. Como se pode constatar o desvio é muito pequeno. Tem-se uma  $FWHM = 0,02\text{eV}$  e  $FWHM = 0,11\text{eV}$ , respectivamente. Como esperado tem-se maior resolução para menor energia do feixe.

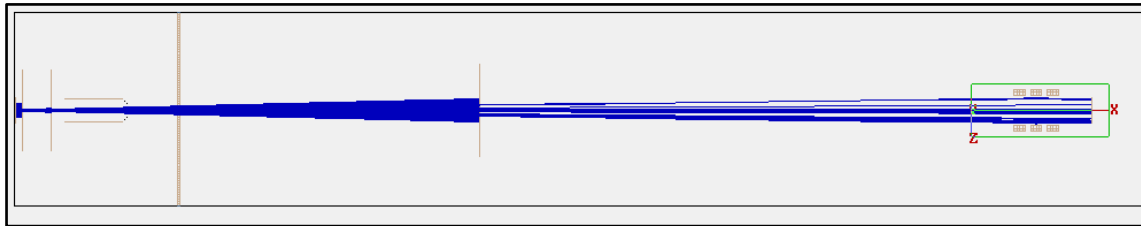


**Figura 5.9.** Sinal derivado do espectro de energia para um feixe de iões de potássio de 50eV e 100eV.

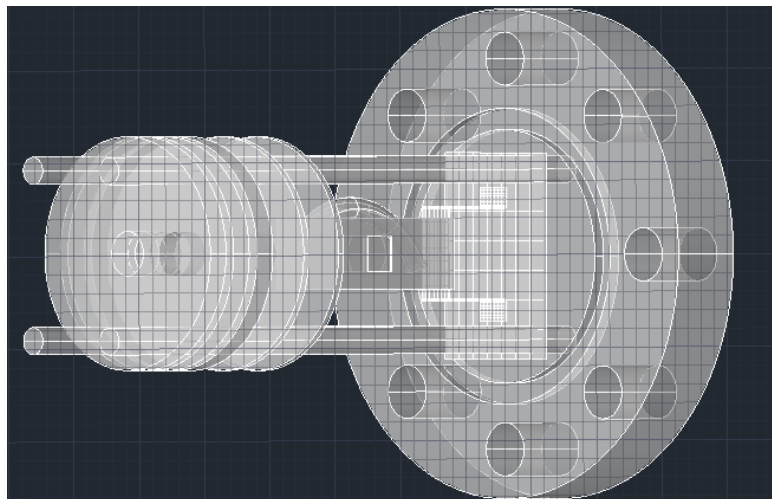
Pela análise dos gráficos da figura acima, o sistema projectado é capaz de medir desvios de energia de 0,1eV para um feixe de 100eV. A sua sensibilidade é inferior aos desvios que são esperados. Presume-se que o desvio de energia ande perto de 0,5eV para um feixe de 100eV. A grandeza  $\Delta V/V$  altera-se com a energia do feixe, devido às perdas de energia sofridas no interior da lente Einzel.

Todos os componentes estão montados nos varões de aço-inox que estarão fixos na flange. Os eléctrodos têm um espaçamento, entre cilindros, de 2mm, ocupando um comprimento equivalente a 22mm. A primeira rede encontra-se a 2mm de distância do último eléctrodo. Ambos estão ligados à massa (potencial nulo) pelo que nesse espaço a diferença de

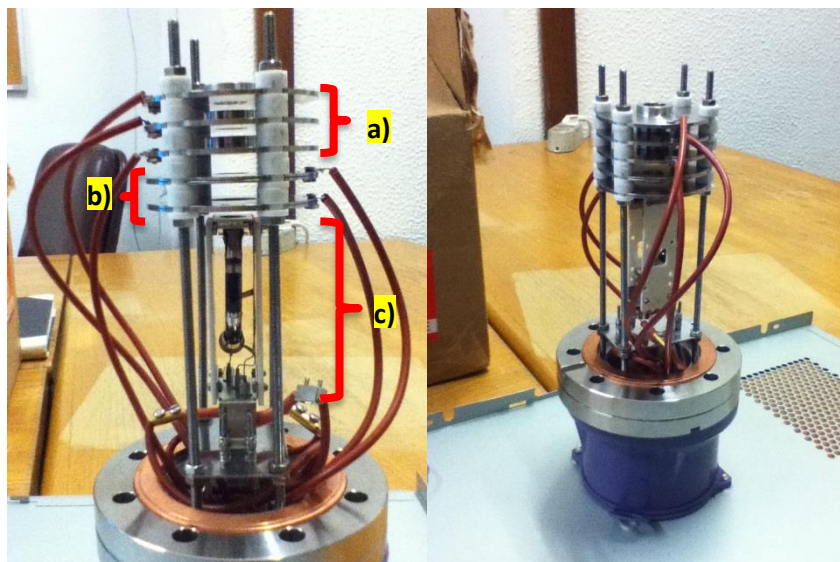
potencial é nulo. A segunda rede está a 5mm de distância da primeira, cujo conjunto corresponderá ao analisador e a distância entre as redes à distância de desaceleração. A entrada do detector canaltrão encontra-se imediatamente depois a cerca de 5mm de distância. O espaço que os iões atravessam corresponde a uma distância total de 33mm. O analisador tem um comprimento total estimado em 120mm. Todo o sistema é montado no final da trajectória do feixe de iões de potássio, a cerca de 600mm da fonte de iões. As figuras (5.11) e (5.12) mostram a montagem do analisador de dispersão de energia e as figuras (5.10) e (5.13) mostram a localização do analisador.



**Figura 5.10.** Esquema que ilustra o posicionamento da lente.



**Figura 5.11.** Esquema da montagem do analisador de dispersão em energia efectuado em AUTOCAD.



**Figura 5.12.** Fotografias do analisador de dispersão de energia construído, em que se pode observar: a) a lente *Einzel*; b) o analisador de energia por retardamento; c) o detector do tipo canaltrão.



**Figura 5.13.** Fotografia onde é possível observar o circuito de polarização do detector do tipo canaltrão no local onde o analisador foi inserido.





## 6. Conclusões e Trabalho Futuro

### 6.1. Analisador de dispersão de energia

Foi desenvolvido um analisador de energia para estudar a dispersão em energia do feixe de potássio. Este é constituído por uma lente *Einzel*, um analisador de retardamento e um detector do tipo canaltrão. Foram maquinados 5 discos de aço de 61mm, nos quais foram feitos furos de 12mm. Em dois desses discos foi colocada uma rede de aço muito fina, de alta transmissão, (analisador de retardamento) a cobrir a abertura, enquanto nos outros três foram embutidos três cilindros com 6mm de altura cada, (lente). Foi ajustada uma recta de calibração da tensão aplicada na lente *Einzel* em função da energia do feixe. Esta recta é válida para um afastamento igual a 2 mm, entre os eléctrodos. Foi determinada a resolução do aparelho que se verificou não ser constante. De acordo com os dados que se encontram no capítulo 5, obteve-se uma resolução de 0,1% para um feixe de 100eV.

Na realização desta dissertação foram desenvolvidas aptidões relacionadas com desenho técnico, simulação na área da óptica de partículas carregadas, e trabalho de maquinação.

### 6.2. Simulações

Neste sub-capítulo são apresentados os resultados mais relevantes, cobrindo nomeadamente os dados obtidos em SIMION sobre as transmissões do feixe ao longo de toda a sua trajectória e os dados referentes às configurações sugeridas para o sistema de extracção e sistema de focalização.

#### 6.2.1. Configuração actual

Os resultados obtidos sobre os valores da transmissão do feixe após a câmara de troca de carga e a fenda de colimação foram bastante esclarecedores. Existe um aproveitamento pouco significativo de iões  $K^+$ , causado por diversos factores: a taxa de troca de carga determinou-se andar à volta dos 19%; Face a relação entre as dimensões da fonte de  $K^+$  e da abertura da CTC, e dos iões que são emitidos, usando uma geometria planar do sistema extractor (que envolve a fonte de iões  $K^+$ ), apenas 0,4% dos iões produzidos saem da respectiva câmara de troca de carga; Pelos valores das intensidades de correntes obtidas para diferentes tensões de aceleração, pode-se concluir que a densidade de corrente é limitada devido ao efeito de carga espacial. Existe também uma clara dependência linear entre a energia do feixe e a tensão de aceleração. O factor que relaciona ambas as grandezas não é unitário, mas sim igual a 0,91. Ou seja, para uma tensão de aceleração de 100V, produz-se um feixe com cerca de 91eV de energia efectiva. Tal facto também se encontra relacionado com a geometria do sistema em uso.

A perda de iões entre a câmara de troca de carga e a fenda de colimação é, de acordo com as simulações efectuadas em SIMION, perto de 1%, facto esse corroborado pela relação entre a intensidade de corrente obtida no tira-iões e a obtida no detector LT. Após a colimação do feixe foi possível observar que a extensão angular do feixe é muito pequena não sendo necessário aplicar tensões muito altas na lente *Einzel* para alterar a sua trajectória na direcção desejada. Apesar das tensões baixas aplicadas na lente, o feixe sofre um pequeno desvio de energia influenciando a resolução. A incerteza associada ao analisador de dispersão de energia foi determinada recorrendo ao SIMION, para feixes com exactamente 20eV, 50eV e 100eV. A grandeza  $\Delta V/V$ , como já foi referido anteriormente, não foi constante, possivelmente

derivado aos desvios de energia que o feixe sofre no interior da lente, não apresentar uma relação linear com a sua energia.

### **6.2.2. Sistema de extracção e de focalização**

Face aos valores baixos de transmissão obtidos em ambiente SIMION, e a uma cuidada análise da trajectória do feixe, foi possível concluir que a geometria planar do sistema extractor é pouco eficiente. Dado a relação entre o diâmetro da fonte de iões e da abertura da CTC ser muito grande (e devido à proximidade entre o ânodo e a câmara de troca de carga), o campo eléctrico além de não ter qualquer poder focal nessa distância de aceleração, penetra no interior da câmara pela respectiva abertura onde ocorre um efeito divergente dispersando o feixe no seu interior. Conclui-se que há necessidade de alterar a geometria do ânodo e implementar um sistema lentes constituído por um conjunto de eléctrodos que permitirão um maior controlo sobre o feixe. Um novo sistema extractor poderá permitir obter transmissões entre 5 e 6% na zona de colisões, 1000 vezes superior à transmissão actual.

### **6.3. Trabalho Futuro**

No seguimento deste tema os projectos que se colocam para trabalhos futuros centram-se na optimização da transmissão do feixe que passaria pela implementação de um sistema de lentes convergente e a alteração da geometria do ânodo. Das sugestões colocadas no capítulo 4, a sugestão da cavidade cilíndrica foi testada através da inserção do molibdénio envolvendo a pastilha de potássio. A distância entre eléctrodos não foi alterada pelo que apenas foi possível constatar um aumento da corrente. Poder-se-á utilizar uma cavidade com as paredes inclinadas para obtenção de melhores resultados. Deste modo forma-se um feixe paralelo para um determinado ângulo de inclinação que depende da massa do ião em causa, bastando apenas variar a posição do foco do sistema de lentes.

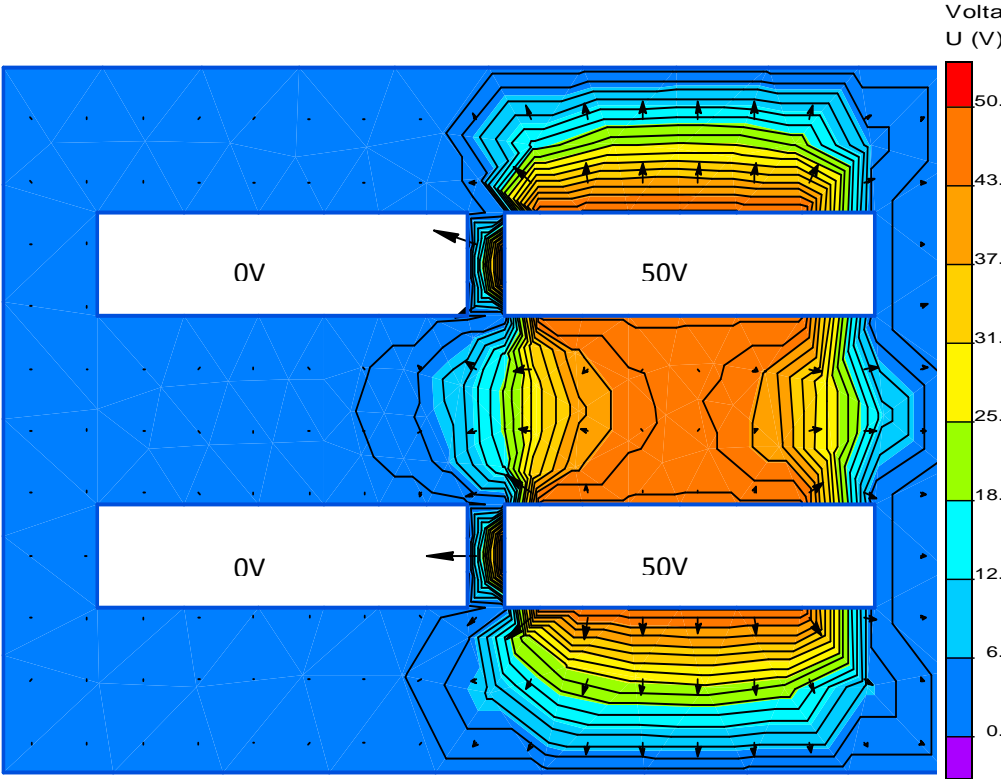
Outro ponto do plano de trabalhos a ser implementado futuramente é a montagem, na câmara de colisões, de um analisador semiesférico de alta resolução que permitirá determinar com exactidão a perda de energia por parte dos iões  $K^+$ , após cederem o electrão à molécula-alvo. Idealmente, este detector seria movível podendo medir a energia dos iões de potássio em diferentes ângulos. Na prática ter-se-á que considerar o espaço disponível na câmara de colisões.

## Referências Bibliográficas

- [1] “Distribuição normal,” 2011. [Online]. Available: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Distribuição\\_normal](http://pt.wikipedia.org/wiki/Distribuição_normal). [Accessed: 19-Nov-2013].
- [2] J. M. Pereira, “Ótica de partículas carregadas,” 2008, pp. 108–132.
- [3] “Lenses : Basic Optics,” vol. 1, pp. 1–43.
- [4] K. R. Spangenberg, “Electrostatic Electron Optics,” in *Vacuum tubes*, p. 356.
- [5] A. Hilger, *Electrostatic Lenses systems*. Taylor & Francis, Inc, 1991, p. 112.
- [6] S. Humphries, *Charged Particle Beams*. Albuquerque, New Mexico: Department of Electrical and Computer Engineering, 2002.
- [7] J. H. Moore, C. C. Davis, M. A. Coplan, and S. C. Greer, “Building scientific apparatus,” 4<sup>a</sup> Edição., Cambridge University Press, 2009, pp. 327– 352.
- [8] R. F. Egerton, “Electron Optics,” in *Physical Principles of Electron Microscopy*, 1858.
- [9] I. David Manura, Scientific Instrument Services, “Chapter 2: SIMION Basics.” [Online]. Available: <http://simion.com/manual/chap2.html>. [Accessed: 24-Sep-2013].
- [10] O. Sise, D. J. Manura, and M. Dogan, “Exploring focal and aberration properties of electrostatic lenses through computer simulation,” *Eur. J. Phys.*, vol. 29, no. 6, pp. 1165–1176, Nov. 2008.
- [11] F. Hinterberger, *Ion optics with electrostatic lenses*. pp. 27–44.
- [12] “wikimedia,” 2007. [Online]. Available: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrostatic\\_analyzer\\_2.gif](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrostatic_analyzer_2.gif). [Accessed: 20-Oct-2013].
- [13] R. A. Antunes Ferreira, “The Role of Halouracils in Radiotherapy Studied by Electron Transfer in Atom-Molecule Collisions Experiments,” Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [14] C. Matias, “Decomposição do Uracilo por colisões átomo-molécula: formação de NCO-,” FCT-UNL, 2011.
- [15] A. M. C. Moutinho, M. E. S. Fronteira e Silva, and M. A. C. Isidoro da Cunha, *Tecnologia de Vácuo*, 1<sup>a</sup> Edição. 1980.
- [16] H. Search, C. Journals, A. Contact, M. Iopscience, and I. P. Address, “Space charge related energy deficit in beams from charge exchange sources,” vol. 408, 1975.
- [17] I. HeatWave Labs, *Aluminosilicate Ion Source Datasheet*, no. 831. 2002.

- [18] M. Sampaio, "Degradação da glicina por transferência de electrão em colisões átomo-molécula," FCT-UNL, 2012.
- [19] A. Hilger, "The Optics of simple Lens systems," in in *Electrostatic Lenses systems*, Taylor & Francis, Inc, 1991, p. 112.

# Anexos



**Figura A.1.** Representação das linhas equipotenciais e mapeamento do campo eléctrico em dois eléctrodos cilíndricos, em que  $V_1=0$  e  $V_2=50V$  para melhor entendimento do comportamento de PC no seu interior. Foi utilizado o software QuickField Student.

**Tabela A.1.** Correntes no detector LT com o forno ligado e desligado.

V (V)	$E_c$ (J)	V (m/s)	I LT (A)	n LT	n pastilha	J (mA/cm <sup>2</sup> )
100	1,60E-17	4,91E+08	2,20E-10	1,24E+10	3,10E+14	1,10E-01
			1,18E-09	6,65E+10	1,66E+15	5,90E-01

Forno ligado

Forno desligado

Densidade de corrente limite na fonte de iões para 100V:

$$J = 5,44 \times 10^{-8} \sqrt{Z/A} \frac{V^{3/2}}{d^2} = 5,44 \times 10^{-8} \sqrt{19/39} \frac{100^{3/2}}{(2,5 \times 10^{-3})^2} = 0,608 \text{ mA/cm}^2 \quad (\text{A.1})$$